



## GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

### TRABAJO FINAL DE GRADO

---

# ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES OCULARES Y CORNEALES EN FUNCIÓN DE LA EDAD



**IRENE CLARAMUNT MIRABALL**

DIRECTORA: MARIA ROSA BORRÁS GARCÍA  
DEPARTAMENTO: ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

FECHA DE LECTURA  
JUNIO 2013





## GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

El Sr./Sra. María Rosa Borrás García, com a director/a del treball

CERTIFICA

Que el Sr./Sra. Irene Claramunt Miraball ha realitzat sota la seva supervisió el treball ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES OCULARES Y CORNEALES EN FUNCIÓN DE LA EDAD que es recull en aquesta memòria per optar al títol de grau en Òptica i Optometria.

I per a què consti, signo/em aquest certificat.

Sr/Sra María Rosa Borrás García  
Director/a del treball

Terrassa, 14 de Juny de 2013

## AGRADECIMIENTOS

Después de todo lo vivido en la realización de este trabajo, tengo que agradecer a muchas personas tanto su ayuda, colaboración, apoyo y ánimos que me han dado durante todos estos meses.

En primer lugar a mi tutora Rosa Borrás, por guiarme y orientarme en todo el momento y ayudarme a realizar este trabajo.

A mi familia, por el apoyo y el ánimo que me han dado. Por hacer que los sienta a mi lado, a pesar de la distancia y de las pocas ocasiones que he tenido de ir a verles.

A mis amigos del pueblo, por estar conmigo en todo momento a pesar de todas las celebraciones que me he perdido y por las múltiples quedadas sin mí.

A los amigos que he conocido durante estos cuatro años en la universidad y que han vivido junto a mí el estrés y nervios en la realización de este trabajo.

A todos mis compañeros de clase, por todos los momentos compartidos y por el mutuo apoyo en la realización de la primera edición del trabajo final de grado.

A Juan Carlos Ondategui, por facilitarme gran parte de la práctica de mi trabajo.

A la empresa Topcon, por la prestación del aberrómetro durante los meses de la parte práctica.

Al centro CD-6 por acogerme y dejar a mi disposición un laboratorio donde poder realizar las prácticas.

A todos los amigos, profesores de la UPC y voluntarios que han formado parte de la muestra para poder realizar este estudio.

A todos ellos:

GRACIAS

*Irene Claramunt Miraball*



## GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

# ESTUDIO DE LAS ABERRACIONES OCULARES Y CORNEALES EN FUNCIÓN DE LA EDAD

### RESUMEN

**OBJETIVO:** Hacer un estudio comparativo de las aberraciones oculares de alto orden, totales y corneales, en dos muestras de diferente rango de edad.

**MÉTODO:** Se evaluaron ambos ojos de un total de 48 individuos, 24 pertenecientes a la muestra de jóvenes y 24 pertenecientes a la muestra de mayores, comparando los resultados de las aberraciones de alto orden entre ambas muestras. También se compararon las aberraciones totales y corneales en función del diámetro pupilar. Todos los resultados fueron medidos en condiciones naturales y en pupila de 4 mm, utilizando un aberrómetro con la técnica Hartmann-Shack.

**RESULTADOS:** Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre condiciones de baja y alta iluminación tanto para jóvenes como para mayores. En condiciones de diámetro pupilar natural, las aberraciones de alto orden, tanto totales como corneales, resultaron ser mayores en la muestra de jóvenes; en cambio al fijar el diámetro pupilar en 4 mm, los mayores presentaron aberraciones más importantes.

**CONCLUSIONES:** Las aberraciones oculares muestran una directa dependencia con el valor del diámetro pupilar: cuanto mayor es éste, mayores son las aberraciones. Las aberraciones también son dependientes de la edad del individuo, mostrando un crecimiento a lo largo de los años. El aumento de las aberraciones de alto orden totales es mayor que el corneal, esto parece ser consecuencia de que en individuos jóvenes las aberraciones internas se compensan con las aberraciones corneales mientras que a medida que avanza la edad las aberraciones internas pierden este papel compensador.



## GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

# ESTUDI DE LES ABERRACIONS OCULARS I CORNEALS EN FUNCIÓ DE L'EDAT

### RESUM

**OBJECTIU:** Fer una comparativa de les aberracions oculars d'alt ordre, totals i corneals, en dues mostres de diferent rang d'edat.

**MÈTODE:** Es van avaluar ambdós ulls d'un total de 48 individus, 24 dels quals pertanyen a la mostra de joves i 24 que pertanyen a la mostra de grans, comparant els resultats de les aberracions d'alt ordre entre ambdues mostres. També es van comparar les aberracions totals i corneals en funció del diàmetre pupil·lar. Tots els resultats van ser mesurats en condicions naturals i en pupil·la de 4 mm, utilitzant un aberròmetre amb la tècnica Hartmann-Shack.

**RESULTATS:** Es van trobar diferències estadísticament significatives entre les condicions de baixa i alta il·luminació, tant per joves com per grans. En condicions de diàmetre pupil·lar natural les aberracions d'alt ordre, tant totals com corneals, van resultar ser majors en la mostra de joves que en la de grans; en canvi al fixar el diàmetre pupil·lar en 4mm, els grans van presentar majors aberracions.

**CONCLUSIONS:** Les aberracions oculars mostren una directa dependència del valor del diàmetre pupil·lar: com major és aquest, més grans són les aberracions. Les aberracions també depenen de l'edat del individu, mostrant un creixement al llarg dels anys. L'augment de les aberracions d'alt ordre totals és major que el corneal; això sembla ser conseqüència del fet que, en individus joves, les aberracions internes es compensen amb les aberracions corneals mentre que, a mesura que avança l'edat, les aberracions internes perden aquest paper compensador.



## GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

# STUDY OF OCULAR AND CORNEAL ABERRATIONS DEPENDING ON THE AGE

### ABSTRACT

**OBJECTIVE:** To make a comparison on high-order ocular aberrations, corneal and total, in two different age range samples.

**METHODS:** We evaluated both eyes of a total of 48 individuals, 24 belonging to the sample of young people and 24 belonging to the sample of older ones, comparing the results of higher-order aberrations in both samples. We have also compared total and corneal aberrations according the pupil diameter. All results were measured in natural conditions, in a 4 mm pupil, using an aberrometer with Hartmann-Shack technical.

**RESULTS:** The ocular high order aberration showed statistically differences between low-lighting and high-lighting for both young and old. In natural pupil diameter conditions, higher-order aberrations, both total and corneal, proved to be higher in young people than in older, however, fixing the pupil diameter in 4 mm, the aged presented higher aberrations.

**CONCLUSIONS:** Ocular aberrations show a special dependency on the value of the pupil diameter, the greater this is, the greater aberrations are. Aberrations are also dependent on the age of the individual, showing a growth over the years. The increase of higher-order total aberrations is greater than the corneal; this seems to be a consequence of the fact that, in young individuals, internal aberrations are offset with corneal aberrations whereas, as individuals grow older internal aberrations lose this compensating role.



## GRADO EN ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

# STUDY OF OCULAR AND CORNEAL ABERRATIONS DEPENDING ON THE AGE

### SUMMARY

The aim of this study is to compare ocular higher-order aberrations between two different samples, young people between 18 and 25 years old and people older than 50. The aberrations are of currently being studied in optometry and ophthalmology clinical environment. It's really important to know the existing aberrations in the eye to analyse visual discomfort of healthy patients and patients with ocular pathology and for planning various surgeries, such as cataracts or refractive surgery.

The eye is an optical system responsible for the sense of sight; thanks to him we can see the objects around us. Before the human being perceives a image, the information that we receive through the eye should make a journey, it called as visual process. It consists of three different stages: optics stage, retinal stage and cortical stage. The image is formed by the entrance of a light beam through all the optics of the eye, tear film, cornea, aqueous humour, lens, vitreous and retina.

Once the image has been formed on the retina, it then sends the information received through the optic nerve to the brain, specifically to the areas 17, 18 and 19 where the information is processed.

Each person may have a different perception of the images, not always a perfect picture will be observed, but this image will present a different quality depending on the individual. This is due to the degradation of visual quality, which depends on the refractive error of each person and on other three factors: diffraction, scattering and aberrations.

Monochromatic ocular aberrations are the topic on which this paper will focus, so first of all you should be familiar with the concept: An aberration is the difference between the actual wavefront and the ideal wavefront.





Monochromatic aberrations can be divided into: (1) constant aberrations which do not affect the visual quality, (2) low-order aberrations showing refractive error, and (3) high order aberrations that are those that cannot be corrected by conventional optical measures and are studied further in the current work. The easiest way to measure aberrations is by the sum of Zernike polynomials, which are distributed in a pyramid organized by aberration orders.

To measure aberrations an aberrometer with a wavefront sensor is used. There are two types of aberrometers, those using Hartmann-Shack technique and those using ray tracing technique. Besides using a technique called double pass, we can measure and study the quality of the image, in which aberrations are included.

In the same individual, the aberrations don't remain constantly and they can be influenced by the effect of different factors: the pupillary diameter, accommodation, the eccentricity and the age. The age-related changes in ocular aberrations is the main theme of this assignment, and because of this, it is needed to know the physiological changes that an individual presents with the pass of time in life. Just because of aging, there are structural and functional changes in all the organs and tissues, although it doesn't happen in all the individuals in the same way. Also the eye will suffer a number of modifications that can affect the quality of the image. All the eye's structures make old, although with a different timing and with a different value. The biggest change is produced in the lens, which has a loss of transparency and a change in its geometry. However, the tear, cornea, humours and retina are affected too.

Once the main aspects related to ocular aberrations are known, it will be explained how this research has been done.

For measuring the ocular aberrations it is used one of the two aberrometers that use Hartmann-Shack's technique, specifically the Topcon Kr-1w aberrometer. Besides of measure the total aberrations, this aberrometer makes different functions: it is auto-refractometer, it does the measurement of the pupillary diameter and allows to measure the corneal aberrations because of the addition of two Placido's disc, which let to get the keratometric radius and the topography of the cornea. With the information gathered of the total aberrations and the corneal aberrations, the same tool makes an estimation of the internal aberrations.

In this research, it is studied two samples of individuals of different age ranges. The first one has 24 individuals between 18 and 24 years old, and the second one has 24 individuals older than 50 years. The subjects were selected according the following inclusion criteria: not using rigid contact lenses, not having used contact lenses the last 48 hours, not having undergone ocular surgery, not using ocular drugs during the last 3 hours, and the most important, not having ocular pathologies because the research is done in healthy eyes.

To make possible a work with the pupil diameter, each subject we will take three different and consecutive measurements in each eye: First in low illumination and after that in high illumination, obtaining a total of twelve measurements between both eyes. With the information obtained, we'll work with the ocular aberration's values depending on the natural pupil diameter in both kind of illumination with a fix diameter about 4mm.



A statistical analysis will be realized by means of the program SPSS V 19. First of all we'll study the results comparing different conditions of illumination with the objective to make possible to see the effects of the pupil diameter on the aberrations, and then we'll have to compare the final results in both of the different age groups. Secondly, we will only care about the aberrations to a pupil diameter equal to 4 mm, and in this way be able to compare the measures of the aberrations between both age groups controlling the variability which introduces the pupil diameter.

The same process is repeated for the case of the corneal aberrations, first of all in the natural conditions of the pupil to each person, depending on the illumination and the age, and after in the case of the 4 mm pupil. Finally we'll realize a comparison between the total aberrations and corneal aberrations, and we'll be able to see the changes made. To quantify the ocular aberrations we used the RMS (root-mean-square) wavefront error value in each order of aberration.

The obtained results show that the ocular aberrations present in the eye of one of the same persons are higher in conditions of low illumination than in high illumination. This fact is showed statistically and clinically significant to the total aberrations as equal as corneal aberrations, taking in mind the full sample in each group of ages.

When we compare the results between both groups of age in conditions of natural size of the pupil, we can observe differences between both groups of age statistically important, in most of the cases, all of the orders of aberrations obtaining that young people present more aberrations than older ones. When analyse the results for a pupil size of 4 mm we can appreciate some important differences in all of the orders of ocular aberrations studied, but in this occasion are the subjects over 50 years old whom present higher value for total and corneal aberrations. When we study the results of the difference in the magnitude of the aberrations between both samples we can appreciate that the differences are clinically important too.

The third section the comparison is made between total and corneal aberrations under conditions of natural pupil diameter and 4 mm pupil diameter. The most relevant was than in 4 mm pupil diameter can be seen how the total aberrations further grow in age corneal aberrations that this is related to the internal aberrations in young patients are partially offset, however, in big ones is exactly the opposite. In the case of natural pupil diameter although young people have more aberrations it can be seen the phenomenon compensator lens as the total aberrations are smaller than the cornea.

As first conclusion, we can say that both total and corneal aberrations depend strongly on pupilar diameter, the longest the diameter is, the bigger the aberrations are. Secondly, it is observed that, to natural pupil diameters, ocular aberrations are higher in younger than in older group due to the high dependence of these with the pupil diameter. As third conclusion, once has been controlled the pupil diameter of 4 mm aperture, aberrations show both total and corneal to be of more value in older sample, so we can say that the higher-order aberrations are related with age so in older group there are more aberrations. Fourthly, although total aberrations grow depending on the age, the corneal aberrations perform minor variation. As a final conclusion, we can indicate that some of the young internal aberrations are compensated by corneal aberrations, making the total aberrations are lower, whereas in group over 50 years old ones such compensation is broken.

## ÍNDICE

1. Introducción.....	1
2. Marco teórico.....	2
2.1. El sistema visual.....	2
2.2. Calidad óptica de la imagen.....	6
2.3. Aberraciones.....	8
2.4. Instrumentos de medida de las aberraciones.....	15
2.5. Factores que influyen en las aberraciones.....	17
2.6. Cambios fisiológicos del ojo con la edad.....	18
3. Objetivos.....	20
4. Instrumentación y metodología.....	21
4.1. Instrumentación.....	21
4.2. Consideraciones éticas a tener en cuenta.....	26
4.3. Selección de la muestra.....	27
4.4. Protocolo de medida.....	28
5. Resultados.....	30
5.1. Tratamiento estadístico.....	30
5.2. Descripción de la muestra.....	31
5.3. Análisis previos a los resultados.....	32
5.4. Aberraciones totales.....	33
5.5. Aberraciones corneales.....	41
5.6. Comparación de las aberraciones.....	50
6. Discusión y conclusiones.....	56
6.1. Discusión.....	56
6.2. Conclusiones.....	58
6.3. Conclusiones personales.....	58
7. Bibliografía.....	60

## ANEXOS

Anexo I: Consentimiento informado.

Anexo II: Ficha del paciente.

Anexo III: Registro del paciente.

Anexo IV: Tablas de las medidas obtenidas con el aberrómetro.

Anexo V: Tablas descriptivas aberraciones totales

Anexo VI: Tablas descriptivas aberraciones corneales

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Estructura del globo ocular, indicando los diferentes medios por los que pasará un rayo de luz antes de llegar a la retina.

Fig. 2. Disco de Airy y anillos de difracción.

Fig. 3. Desviación de los rayos de luz al interactuar con diferentes medios.

Fig. 4. Mapa de color de las aberraciones totales oculares.

Fig. 5. Frente de onda perfecto (negro), frente de onda aberrado (rojo). La diferencia entre ambos es lo que se conoce como aberración de frente de onda.

Fig. 6. A la izquierda se encuentra la aberración cromática longitudinal, y a la derecha la aberración cromática transversal.

Fig. 7. Representación de la pirámide de los polinomios de Zernike, mediante un mapa de colores. La gama del verde representa un nivel cero de medida en micras y poco o ningún error aberrométrico. Los colores fríos muestran el frente de onda lento o más atrasado con respecto al plano ideal. Los colores calientes representan el frente de onda lento o más rápido con respecto al plano de referencia cero.

Fig. 8. Mapa en escala de grises de la función de dispersión de punto en cada uno de los polinomios.

Fig. 9. Pérdida de contraste al aumentar la frecuencia espacial de dos direcciones x e y.

Fig. 10. Esquema de la técnica de trazado de rayos láser.

Fig. 11. Esquema de la técnica Hartmann-Shack .

Fig. 12. Esquema de un sistema de doble paso.

Fig. 13. Instrumentación: Aberrómetro Topcon KR-1W.

Fig. 14. Esquema de la técnica Hartmann-Shack.

Fig. 15. Imagen de Hartmann-Shack.

Fig. 16. Captura de la pantalla en la pantalla de inicio en el aberrómetro Topcon KR-1W.

Fig. 17. Captura de pantalla del mapa múltiple obtenido con el aberrómetro Topcon KR-1W.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados obtenidos en el laboratorio donde se realiza la parte práctica del trabajo. Temperatura (°C), Humedad (%) e Iluminación (lux).

Tabla 2. Datos de la muestra utilizada en el estudio, incluyendo los valores medios, desviación estándar, valor mínimo y máximo.

Tabla 3. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en toda la muestra en baja y alta iluminación. S3: RMS para tercer orden. S4: RMS para cuarto orden. S5: RMS para quinto orden. S6: RMS para sexto orden. S HOA: RMS para aberraciones de alto orden.

Tabla 4. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en la muestra de jóvenes en baja y alta iluminación.

Tabla 5. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en la muestra de mayores en baja y alta iluminación.

Tabla 6. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales, tanto para las condiciones de baja iluminación como para las condiciones de alta iluminación.

Tabla 7. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales en una pupila de 4mm.

Tabla 8. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en toda la muestra en baja y alta iluminación. S3: RMS para tercer orden. S4: RMS para cuarto orden. S5: RMS para quinto orden. S6: RMS para sexto orden. S HOA: RMS para aberraciones de alto orden.

Tabla 9. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en la muestra de jóvenes en baja y alta iluminación.

Tabla 10. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en la muestra de mayores en baja y alta iluminación.

Tabla 11. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones corneales, tanto para las condiciones de baja iluminación como para las condiciones de alta iluminación.

Tabla 12. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales en una pupila de 4mm.

Tabla 13. Comparación entre la diferencia existente de las aberraciones totales entre jóvenes y mayores, y la diferencia de las aberraciones corneales entre jóvenes y mayores.

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Representación de los errores refractivos que presenta la muestra según el rango de edad.

Gráfica 2. Gráfico de dispersión de puntos. Muestra el aumento del RMS de las aberraciones totales de alto orden en función del diámetro pupilar.

Gráfica 3. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración entre jóvenes y mayores, diferenciando si se trata de iluminación escotópica o fotópica.

Gráfica 4. Aberraciones totales representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación tanto entre edades (jóvenes y mayores), como entre iluminaciones (escotópica y fotópica).

Gráfica 5. Gráfico de barras representando los diferentes órdenes de RMS en las aberraciones totales comparando jóvenes con mayores.

Gráfica 6. Representación gráfica de los órdenes RMS mediante barras de error teniendo en cuenta el intervalo de confianza (IC), tanto para jóvenes como para mayores.

Gráfica 7. Dispersión de puntos para las dos muestras según la edad que presenta cada individuo, en el caso del RMS para el global de las aberraciones totales de alto orden.

Gráfica 8. Gráfico de dispersión de puntos. Muestra el aumento del RMS de las aberraciones corneales de alto orden en función del diámetro pupilar.

Gráfica 9. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración entre jóvenes y mayores diferenciando si se trata de iluminación escotópica o fotópica.

Gráfica 10. Aberraciones corneales representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación tanto entre edades (jóvenes y mayores), como entre iluminaciones (escotópica y fotópica).

Gráfica 11. Gráfico de barras representando los diferentes órdenes de RMS en las aberraciones corneales comparando jóvenes con mayores.

Gráfica 12. Representación gráfica de los órdenes RMS mediante barras de error teniendo en cuenta el intervalo de confianza (IC), tanto para jóvenes como para mayores.

Gráfica 13. Dispersión de puntos para las dos muestras según la edad que presenta cada individuo, en el caso del RMS para el global de las aberraciones corneales de alto orden.

Gráfica 14. Aberraciones representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación entre edades (jóvenes y mayores) para cada sección correspondiente (totales, corneales e internas).

Gráfica 15. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración según la sección de la que se trate (totales, corneales e internas) tanto entre baja y alta iluminación, como entre jóvenes y mayores.

Gráfica 16. Barras de errores representando el global de aberraciones de alto orden totales, corneales e internas tanto para jóvenes como para mayores, en condiciones de baja iluminación.

Gráfica 17. Barras de errores representando el global de aberraciones de alto orden totales, corneales e internas tanto para jóvenes como para mayores, en condiciones de alta iluminación.

Gráfica 18. Gráfica agrupada, representando el RMS para cada orden de aberración, pudiendo comparar entre jóvenes y mayores, y mediante filas entre totales corneales e internas para una pupila de 4mm.

## **ÍNDICE DE ECUACIONES**

Ecuación 1. Representación matemática del concepto de aberración de onda, como la suma de todos los valores para cada punto de la pupila.

Ecuación 2. Representación matemática de los polinomios de Zernike.

Ecuación 3. RMS de las aberraciones de alto orden.

## 1. INTRODUCCIÓN

El ojo humano es un sistema óptico encargado de focalizar las imágenes de un objeto en nuestra retina y es el primer paso para que la visión sea posible.

Existen diversos factores que influyen en la calidad de la imagen retiniana y diversos instrumentos que nos permiten identificarlos y cuantificarlos. En el presente trabajo nos centraremos en el estudio de las aberraciones oculares y para ello se utilizará un aberrómetro basado en la técnica Hartmann-Shack, el cual nos proporcionará el valor de las aberraciones inducidas por las distintas estructuras oculares que hacen que la imagen obtenida en nuestra retina no sea perfecta. No obstante, no hay que olvidar que la percepción que obtenemos de los objetos puede parecerse perfecta gracias a la ayuda del sistema neuroretiniano.

Actualmente, el aberrómetro es un instrumento cada vez más utilizado, tanto en diversos estudios sobre la calidad de la imagen como en el ámbito clínico. Es por ello, que es de crucial importancia conocer su funcionamiento y la interpretación de los resultados obtenidos.

Son muchos los centros médicos que trabajan actualmente con un aberrómetro, con la finalidad de poder identificar y corregir las aberraciones, no solo aberraciones de bajo orden como los errores refractivos que se pueden corregir con prescripción óptica, lentes de contacto o incluso cirugía, sino también en las aberraciones de alto orden. Estas son importantes cuando se habla de cirugía refractiva, de cataratas, en pacientes con queratocono, etc, tanto en un inicio, para conocer las características iniciales de los pacientes, como con posterioridad a la cirugía para así hacer el seguimiento y las posibles correcciones.

Hoy en día hay muchos estudios sobre aberraciones oculares, llegando todos ellos a conclusiones muy interesantes y no siempre coincidentes. Muchos de los estudios se basan en ojos sanos, teniendo en cuenta diversos rangos de edades (Brunette et al 2003), diferentes tamaños de pupila (Ginis et al 2003), repetitividad del instrumento (Piñero et al 2011; Peris 2010), pero también hay otros estudios basados en ojos patológicos como el caso del queratocono (Maeda et al 2002), en ojos pre y post cirugía láser (Yang et al 2011) o cirugía cataratas (Chan Lin et al 2010).

Teniendo en cuenta la información ya existente, se realiza el presente trabajo basado en las aberraciones oculares y corneales en función de la edad.

A todo ello hay que sumar mi interés personal en este campo ya que considero importante conocer con mayor profundidad las técnicas actuales en el ámbito clínico, tanto su realización como la interpretación de los resultados. El campo de la cirugía desde siempre me ha creado especial interés por lo que encuentro interesante profundizar en el tema de las aberraciones, ya que actualmente se está utilizando mucho y me podrá ser útil posteriormente en el trabajo como optometrista.



## 2. MARCO TEÓRICO

En este apartado se van a tratar brevemente los conceptos que, de una u otra forma, están relacionados con las aberraciones oculares. Se empezará haciendo una explicación del sistema visual y de cómo es la imagen que se forma en nuestra retina. Esta imagen se verá afectada por diferentes factores, entre ellos las aberraciones, por lo que se hará una breve explicación de los principales conceptos antes de pasar a la parte experimental.

### 2.1. EL SISTEMA VISUAL

El ojo es el órgano encargado del sentido de la vista, a través del cual nos llega el 75 % de la información que recibe el ser humano. El globo ocular, en su conjunto, tiene una refracción total de 60 D aproximadamente. La información que recibimos a través del ojo tiene que realizar un trayecto antes de que el ser humano la perciba.

Es lo que denominamos **proceso visual**, que está formado por tres etapas diferentes: Etapa óptica, etapa retiniana y etapa cortical.

- Etapa óptica: Es la etapa en la que se forma una imagen invertida en la retina.
- Etapa retiniana: Una vez formada la imagen en la retina, los fotorreceptores captan la información y transforman la energía luminosa en impulsos nerviosos.
- Etapa cortical: Los impulsos nerviosos llegan hasta las zonas corticales donde se hace la interpretación de la escena observada.

Se hablará ahora de las diferentes estructuras (*Fig. 1*) por las que pasa la luz antes de llegar a la retina:

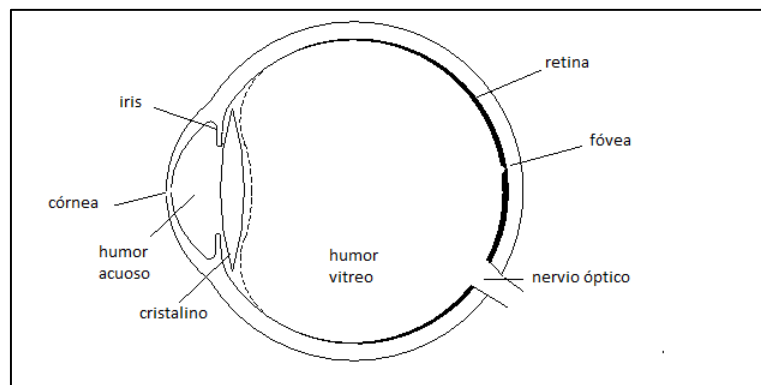


Fig. 1. Estructura del globo ocular, indicando los diferentes medios por los que pasará un rayo de luz antes de llegar a la retina. (J.Optics 2003)

#### **Película lagrimal:**

El primer elemento por el que pasa la luz al llegar a nuestro ojo es la película lagrimal, que actúa como si fuese un dioptrio del ojo. La principal función que realiza es cubrir las irregularidades de la superficie anterior de la córnea; también presenta una función de protección, lubricación y nutricional.

Así mismo, la película lagrimal juega también un papel muy importante en la calidad visual, ya que ojos con peor calidad de lágrima u ojos secos obtienen una imagen retiniana de menor calidad.

### **Córnea**

La córnea es una estructura fibrosa que forma parte de la túnica externa del globo ocular. Como características principales, mayoritariamente presenta forma de elipse prolata, es un tejido transparente gracias al perfecto orden de su tejido fibroso, es avascular ya que carece de vasos sanguíneos, y es rica en nervios por lo que es un tejido muy sensible. Anatómicamente está limitada por la cara anterior con la película lagrimal y por la cara posterior por el humor acuoso. Tiene forma de una lente convexo-cóncava, y es la primera lente por la que pasa el haz de luz al entrar a nuestro sistema óptico proporcionando un poder dióptrico de unas 44 dioptrías. Sus principales funciones son las de permitir el paso de la luz y proteger las estructuras internas del ojo.

### **Humor acuoso**

El humor acuoso es un líquido transparente que se forma en los procesos ciliares y se encuentra en la cámara anterior del ojo. Su principal función es mantener la presión intraocular y aportar los nutrientes necesarios a la córnea y cristalino para su metabolismo. Del equilibrio entre la formación y drenaje del humor acuoso depende el mantenimiento de una presión intraocular adecuada. También influye en la refracción de la luz que incide a nuestro ojo antes de pasar por la retina.

### **Iris**

El iris es un diafragma circular y pigmentado que separa la cámara anterior de la cámara posterior; el orificio del diafragma es lo que conocemos como pupila. La principal función del iris es regular la luz que llega hasta la retina mediante miosis o midriasis de la pupila, aunque también se encarga de la formación de glicosaminoglicanos del vítreo.

Actúa como diafragma de abertura en el sistema óptico del ojo. Dispone de dos músculos: el músculo esfínter del iris y el dilatador del iris, encargados de la variación del diámetro en función del nivel de iluminación; esto hace que la cantidad de luz que llega a nuestra retina pueda variar. Según si el diámetro es mayor o menor la calidad visual variará, ya que entran en proceso la difracción (cuando el diámetro pupilar es muy pequeño) o la aberración (cuando el diámetro pupilar es mayor). En general el diámetro de la pupila puede variar entre 2mm y 8mm en función del nivel de iluminación. También puede variar debido a otros factores como acomodación, edad, emociones, drogas y fármacos.

### **Cristalino**

El cristalino es una lente de forma biconvexa que limita por la cara anterior con el humor acuoso y por cara posterior con el humor vítreo. Se caracteriza por ser una lente transparente debido a que todas sus fibras se encuentran ordenadas, carecer de vasos y de nervios, por lo que se nutre con ayuda del humor acuoso mediante ósmosis. Se caracteriza también por su

elasticidad la cual puede realizar pequeños cambios de enfoque en función de la acomodación. La potencia dióptrica media es de aproximadamente 22 D. El cristalino permite focalizar el haz de luz que entra en nuestro ojo hacia la retina, proporcionando una imagen invertida.

### **Humor vítreo**

El humor vítreo es una mezcla de gel-líquido transparente y avascular que se encuentra entre la superficie posterior del cristalino y la retina ocupando la cámara posterior. Su principal función es proporcionarle la forma esférica al globo ocular, ya que ocupa la gran parte del volumen del ojo, contribuye también a la fijación de la retina sobre la coroides y aporta un pequeño poder dióptrico al ojo.

Las fibras de colágeno que forman el humor vítreo se encuentran separadas entre sí de tal forma que impiden la dispersión de la luz.

### **Retina**

La retina forma parte de la capa más interna del globo ocular que contiene células sensibles a la luz, por lo que es una capa fotosensible que recibe la luz del exterior después de atravesar todos los medios comentados anteriormente formándose una imagen invertida.

Podemos dividir la retina del globo ocular en una parte más central y otra periférica. La retina central contiene células fotorreceptoras de tipo cono. En ella está situada la mácula, una mancha oval de aspecto sonrosado con una depresión central llamada fóvea que ocupa los 5° centrales y en su interior (1°) se encuentra la foveola, que es la región de máxima discriminación visual. La retina periférica contiene células tipo bastón y escasos conos.

La retina está formada por diez capas diferentes las cuales captan y procesan la luz para transformarla en impulsos nerviosos y ser enviados a las zonas corticales. Junto con la corteza visual, es la encargada del proceso visual.

La retina está formada por tres tipos de células: células pigmentadas, neuronas y células de sostén. Seguidamente se profundizará más en los tipos de neuronas que forman la retina, ya que nos ayudarán a entender posteriormente el proceso visual.

**Células fotorreceptoras:** son neuronas capaces de captar y transformar la energía luminosa proveniente del exterior en impulsos nerviosos. Existen dos tipos de fotorreceptores: los conos y los bastones. Los conos son células que permiten la discriminación de las formas y del color, son poco sensibles a la luz, por lo que son óptimos para la visión diurna; se encuentran mayormente en la retina central. Los bastones son células específicas de la detección de movimientos, solo perciben el color blanco y negro son más sensibles a la luz, por lo que son óptimos en la oscuridad; se encuentran en la retina periférica y son más abundantes que los conos.

**Células bipolares:** son neuronas intermediarias que se encargan de realizar la conexión entre los fotorreceptores y las neuronas ganglionares.

**Células ganglionares:** son neuronas que reciben información de los fotorreceptores para transmitir esa información hacia el cerebro. La información es enviada mediante axones que convergen en la papila óptica y forman el nervio óptico, siendo el primer paso para conectar la retina con el cerebro.

**Células horizontales y células amacrinas:** Son interneuronas moduladoras que hacen de intermediarias en la transmisión de información de los fotorreceptores a las células ganglionares.

Todos estos medios oculares tienen especial importancia a la hora de formarse la imagen de un objeto en la retina e influyen directamente en la calidad que tendrá esa imagen. Todos ellos se encuentran relacionados con la primera y segunda etapa del proceso visual que se explicará a continuación, aunque la imagen final que percibimos puede tener una calidad mayor de la esperada debido al sistema neuroretiniano, que forma parte de la tercera etapa, y es capaz de mejorar la imagen percibida.

### **Proceso Visual**

Etapa óptica: La luz viaja a una velocidad de 300.000 km/s en línea recta, pero, al incidir en el globo ocular, pasa por diferentes medios que presentan distintos índices de refracción, haciendo cambiar la trayectoria del haz de luz. Los diferentes índices de refracción por los que pasa la luz al entrar al interior del ojo humano son: aire  $n=1$ , cornea  $n=1,38$ , humor acuoso  $n=1,33$ , cristalino  $n = 1,40$ , humor vítreo  $n= 1,34$ . La córnea y el cristalino son los principales medios que hacen focalizar el rayo de luz en la retina para que se forme una imagen invertida.

Etapa retiniana: Una vez la información ha llegado a la retina y tenemos formada una imagen invertida, las células fotorreceptoras son las encargadas de captar la energía lumínica y mediante una reacción fotoquímica traducen la energía radiante por iones electrógenos que iniciarán los impulsos nerviosos para poder transmitir la información. Ese impulso nervioso converge hasta llegar a otras capas de células de la retina: las células bipolares y posteriormente las células ganglionares, que a través de los axones envían la información hacia el nervio óptico. Las células horizontales y amacrinas también se encontrarán relacionadas en el trayecto del impulso nervioso permitiendo, de este modo, diferentes combinaciones entre sí.

Etapa cortical: El nervio óptico de ambos ojos, siguen su recorrido hacia el interior del cráneo y converge en un punto denominado quiasma óptico, situado en la base del diencefalo. En el quiasma óptico se produce un entrecruzamiento parcial de fibras que permitirá el inicio de la integración de la información de ambos ojos que tiene lugar en los cuerpos geniculados. Continuando con las fibras, una vez entrecruzadas en el quiasma óptico, tenemos las dos cintillas ópticas, una con un trayecto por el hemisferio derecho y la otra por el hemisferio izquierdo, ambas cintillas ópticas llevan información de ambos ojos. Las cintillas ópticas discurren hacia atrás, hacia los pedúnculos cerebrales y hasta llegar al cuerpo geniculado lateral donde se produce una sinapsis con las terceras neuronas de la vía de información óptica. La mayor parte de los axones que proceden del cuerpo geniculado lateral se dirigen

directamente hacia la corteza occipital, dividida en distintas áreas, cada una de ellas encargadas de una determinada función. En las áreas 17, 18 y 19 de la corteza cerebral es donde terminan la mayoría de las fibras procedentes desde la retina y se procesa la información visual captada por el globo ocular.

Una vez comentado ya el proceso visual, se verá cómo es la imagen obtenida, ya que no va a ser una imagen perfecta, si no que dependiendo del individuo que se trate, la imagen variará en cuanto a calidad influenciada sobre todo por la etapa óptica del proceso visual.

## 2.2. CALIDAD ÓPTICA DE LA IMAGEN

Para evaluar la calidad óptica de la imagen partiremos en primer lugar, de un ojo emétrepe. Un ojo emétrepe sin acomodar tiene el infinito conjugado con la retina, por lo que, en condiciones óptimas, al observar un objeto situado en el infinito, éste formaría una imagen nítida sobre la retina.

En condiciones reales el ojo humano no es un sistema óptico perfecto, por lo que la imagen de un objeto puntual que se forma en la retina no será un punto, sino una mancha. Esto hace que la calidad visual de las imágenes no sea perfecta, si no que pueda tener variaciones según el individuo. El resultado de la calidad visual obtenido en la imagen de la retina, como se ha comentado anteriormente, va a depender de una de las etapas del proceso visual: la etapa óptica.

Una buena calidad óptica la obtenemos cuando la imagen obtenida en nuestra retina tiene el menor emborronamiento posible, éste sería el caso de un sistema óptico casi perfecto; pero en realidad es muy fácil la degradación de esa imagen, haciendo que la calidad visual disminuya y produciendo un mayor emborronamiento de la imagen.

Teniendo en cuenta la etapa óptica, la calidad visual de la imagen formada en la retina, será menor de la que desearíamos debido a que esta imagen se encuentra afectada por tres fenómenos diferentes que degradan la calidad visual. Estos tres fenómenos son: difracción, difusión (*scattering*) y aberraciones.

### 2.2.1. Degradación de la calidad visual

La calidad óptica del ojo no depende solamente de una buena compensación óptica, como es el caso de cuando existen defectos refractivos como miopía, hipermetropía y astigmatismo, sino que también depende de estos otros factores:

**DIFRACCIÓN:** La difracción se produce como consecuencia de las limitaciones que sufre el frente de onda de la luz al pasar por la pupila produciendo, de este modo, una desviación de la dirección de propagación de la luz o haz luminoso al interceptar con el borde del iris del ojo. El efecto de la difracción es inevitable debido a la propiedad intrínseca de las ondas electromagnéticas (*Fig. 2*), pero se puede considerar que un sistema óptico es perfecto si

solamente es este factor el que limita la calidad visual. La difracción será mayor en casos donde la pupila tenga menor diámetro y en casos donde la longitud de onda de la luz proyectada sea mayor. En pupilas de mayor tamaño este factor no contribuye de forma tan significativa en la degradación de la imagen retiniana.

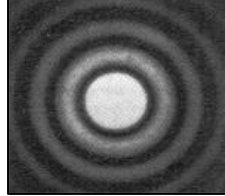


Fig. 2. Disco de Airy y anillos de difracción (Comastri 2007)

**DIFUSIÓN (SCATTERING):** Es generada por la interacción de la luz con moléculas o partículas que cambian de índice de refracción debido a que no existe una homogeneidad de los medios (Fig. 3). Cuando la luz atraviesa la córnea, humores y cristalino, si llega a incidir en algún pequeño cambio de índice de refracción, hace que el rayo de luz se desvíe en otra dirección, provocando una pérdida de nitidez en la imagen retiniana. Aunque se relacione con todos los medios oculares afecta principalmente al cristalino. Es prácticamente despreciable en los jóvenes, pero será más importante ante la presencia de ciertas alteraciones oculares como, por ejemplo, pérdida de transparencia del cristalino, (envejecimiento del cristalino) o bien una pérdida de transparencia corneal (Haze).

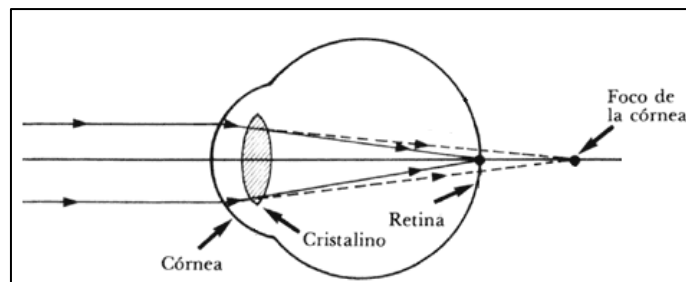


Fig. 3. Desviación de los rayos de luz al interactuar con diferentes medios (Braun 1988)

**ABERRACIONES:** Son producidas por imperfecciones de las superficies ópticas tanto por la forma, por la posición, como por el índice de refracción de los medios. La contribución de las aberraciones de alto orden a la degradación óptica en general (Fig. 4), es menor que la del desenfoque o el astigmatismo (aberraciones de bajo orden), pero no se pueden compensar mediante correcciones ópticas; en cambio las aberraciones de bajo orden afectan en mayor medida en la calidad visual, pero pueden ser corregidas mediante las compensaciones ópticas. Existen diversos factores, como explicaré en el apartado 2.5, que hacen variar la cantidad de aberraciones dentro de un mismo individuo y éstos son: el diámetro de la pupila, la acomodación, la excentricidad y la edad.

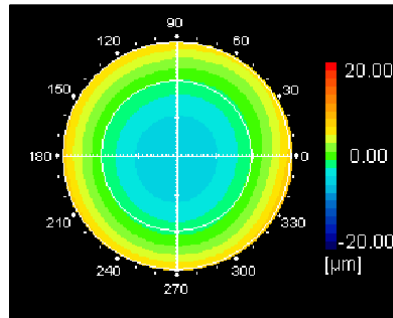


Fig. 4. Mapa de color de las aberraciones totales oculares.

De los tres fenómenos que influyen en la degradación de la calidad visual de la imagen retiniana, a continuación profundizaré más en las aberraciones por ser el tema conductor de este trabajo.

### 2.3 ABERRACIONES

Hay pacientes que aun teniendo buena agudeza visual (AV) manifiestan quejas de su calidad de visión, esto es debido a la degradación de la calidad visual que se produce en la imagen retiniana por influencia de los tres fenómenos descritos en el apartado anterior.

En este apartado explicaré en qué consisten las aberraciones, los diferentes tipos de aberración y cómo se ven influenciados en la imagen retiniana.

La palabra **aberración**, proviene del latín y significa “salirse del camino, o desviarse”. Para entender el término de aberración dentro de un sistema óptico primero debemos conocer qué es un frente de onda.

Un **frente de onda** es una superficie imaginaria que une todos los puntos de igual fase, a partir del cual definiremos qué es una aberración.

Si el ojo fuese un sistema óptico perfecto, el frente de onda resultante al incidir un rayo de luz en nuestro ojo sería completamente esférico con un único centro de curvatura. Pero el ojo humano no es un sistema óptico perfecto, por lo que el frente de onda resultante no es una circunferencia perfecta; esto produce que la imagen formada tenga cierta borrosidad.

A partir de este punto podemos entender la **aberración de onda** como la diferencia de camino óptico entre el frente de onda real (ojo humano), y el frente de onda ideal (sistema óptico perfecto) (Fig. 5).

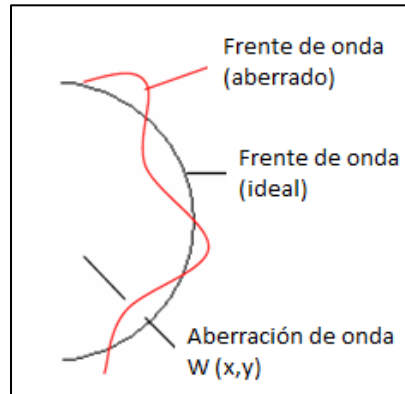


Fig. 5. Frente de onda perfecto (negro), frente de onda aberrado (rojo). La diferencia entre ambos es lo que se conoce como aberración de frente de onda.

Las aberraciones ópticas las podemos dividir en dos grandes grupos:

**Las aberraciones ópticas cromáticas:** El ojo humano está afectado por las aberraciones cromáticas como consecuencia de la propia naturaleza de la luz visible y de la dispersión, produciéndose una degradación de la imagen retiniana. Las aberraciones cromáticas las podemos subdividir en dos tipos: aberración cromática longitudinal y aberración cromática transversal.

- Aberración cromática longitudinal (Fig. 6): Se mide como la variación existente de la potencia refractiva en relación con la longitud de onda de la luz. Según la longitud de onda la imagen de un determinado objeto se situará a distinta distancia de la retina.
- Aberración cromática transversal (Fig. 6): Se mide como la variación existente entre el tamaño de la imagen resultante según la longitud de onda. Según la longitud de onda el tamaño de la imagen variará.

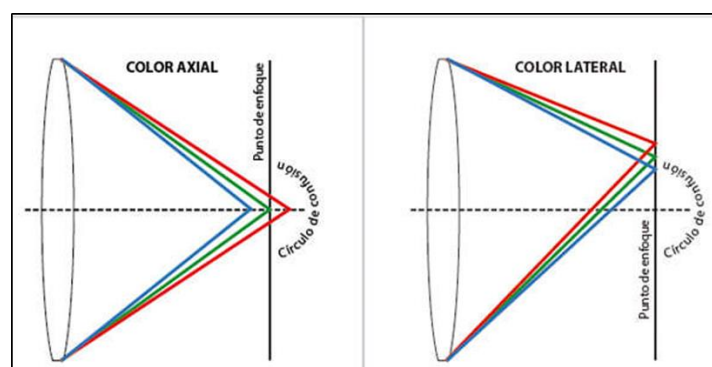


Fig. 6. A la izquierda se encuentra la aberración cromática longitudinal, y a la derecha la aberración cromática transversal (Avila, Guía de About.com)

**Las aberraciones ópticas monocromáticas:** Son aquellas que se producen sin atender a la naturaleza policromática de la luz. Son responsables de deformar y desenfocar la imagen. La presencia de éstas se produce con una longitud de onda específica de la luz visible y solo



puede demostrarse cuando se ha eliminado la aberración cromática mediante el empleo de luz monocromática.

Podemos agrupar estas aberraciones en tres grandes grupos según el orden al que pertenezcan (Vidal 2011). Estos tres grupos son: aberraciones constantes, aberraciones de bajo orden y aberraciones de alto orden.

- **ABERRACIONES CONSTANTES:** Hacen referencia a las aberraciones de orden cero y uno de la pirámide. Son aberraciones invariables en todos los sistemas ópticos y no influyen en la calidad visual ya que no deterioran la imagen retiniana, por lo que no se van a tener en cuenta a la hora de hacer el cálculo total de la aberrometría. Pueden ser compensadas de forma natural con los movimientos del ojo (*Fig. 7*). Son:
  - **Pistón (0,0):** Es un adelanto o retraso de todo el frente de onda respecto al plano de la pupila de salida de un sistema óptico. Considerado como ausencia de aberración.
  - **Tilt (1,-1) o (1,1):** Es la inclinación horizontal o vertical.
- **ABERRACIONES DE BAJO ORDEN:** Se conocen también como ametropías. Son un tipo de aberraciones que pueden diagnosticarse y corregirse con la ayuda de lentes esferocilíndricas en gafa, con lentes de contacto o con cirugía refractiva. Un número abundante de pacientes presentan este tipo de aberraciones ópticas (*Fig. 7*). Son:
  - **Desenfoque (2, 0):** La imagen de un objeto se encuentra o por delante o por detrás de la retina, es decir, se produce un desenfoque de la imagen. Es el caso de la miopía, hipermetropía, presbicia, espasmos acomodativos o la falta de atención a un estímulo.
  - **Astigmatismo (2, -2) o (2, 2):** Se trata de un error refractivo bastante frecuente en los individuos y se produce por el hecho de que dos meridianos perpendiculares de nuestro ojo no presentan la misma curvatura en el frente de onda, por lo tanto la imagen es focalizada en dos planos diferentes, produciendo cierto emborronamiento en parte de la imagen final dependiendo del eje del que se trate.
- **ABERRACIONES DE ALTO ORDEN:** Se trata de las aberraciones que se encuentran a partir del tercer orden. Afectan en menor cantidad que las aberraciones de bajo orden pero pueden llegar a disminuir la calidad de visión en ojos sanos (*Fig. 7*).

La sintomatología más genérica que provocan las aberraciones de orden superior es: Sensación de visión doble, imágenes fantasmas, halos, pérdida de contraste, borrosidad de la imagen, visión no clara, bordes de letras poco nítidos, escaso grado de detalle, deslumbramiento, y mala visión nocturna.

A continuación se describen los diferentes tipos de aberraciones de alto orden, teniendo en cuenta el orden (n) en el que se encuentran (hasta sexto orden):

- **Aberraciones de tercer orden:**
  - **Coma (3, -1) o (3, 1):** Recibe este nombre debido a que la imagen de un punto en individuos que presentan esta aberración, es semejante a la forma de una cometa.

Produce un gran deterioro en la calidad visual, es causado principalmente por la cara anterior de la córnea y en cristalino.

- **Trefoil** (3, -3) o (3, 3): Es el astigmatismo triangular, presenta tres ejes. Su imagen tridimensional representa un frente de onda que avanza, se retrasa y alterna en tres ocasiones distintas. Las principales molestias en los pacientes son deslumbramientos y halos.
- **Aberraciones de cuarto orden:**
  - **Esférica** (4,0): Se refiere a la distancia focal entre los puntos del centro y la periferia de un frente de onda. Es un tipo de aberración frecuente en el ojo que puede ocasionar visión borrosa y halos, aun presentando el 100 % de agudeza visual. La suelen presentar los pacientes que presentan miopía nocturna.
  - **Astigmatismo cuadrático** (4, -2) o (4, 2): El frente de onda obtenido, se avanza y se retrasa en cuatro ocasiones en la periferia, siendo mayor en un eje en concreto.
  - **Tetrafoil** (4, -4) o (4, 4): Muy semejante al astigmatismo cuadrático, también presenta cuatro zonas en periferia donde el frente de onda avanza y se retrasa en cuatro puntos diferentes, pero la afectación en la visión es menor.
- **Aberraciones de quinto orden:** Equivalen a desalineamientos de los componentes ópticos. Tienen más efecto cuanto mayor es el diámetro pupilar.
  - **Coma** (5, -1) o (5, 1)
  - **Trefoil** (5, -3) o (5,3)
  - **Pentafoil** (5, -5) o (5, 5)
- **Aberraciones de sexto orden:** Son consideradas el último orden de significación clínica. El número de aberraciones existentes es prácticamente infinito pero la importancia de órdenes mayores es mucho menor. Las de sexto orden son:
  - **Esférica** (6, 0)
  - **Astigmatismo** (6, -2) o (6, 2)
  - **Tetrafoil** (6, -4) o (6, 4)
  - **Hexafoil** (6, -6) o (6, 6)

Después de definir qué son las aberraciones y clasificarlas, vamos a conocerlas mejor con ayuda de expresiones matemáticas. Las aberraciones de onda son una complicada función de dos dimensiones que, para conocerla de manera completa deberíamos conocer su valor en cada uno de los puntos que forman la pupila. Puede contener infinitos términos, representados mediante:

$$\begin{aligned}
 W(x, y) = & a_{00} + a_{10}x + a_{01}y \\
 & + a_{11}xy + a_{20}x^2 + a_{02}y^2 \\
 & + a_{21}x^2y + a_{12}xy^2 + a_{30}x^3 + a_{03}y^3 \\
 & + \dots a_{mn}x^m y^n + \dots
 \end{aligned}$$

Ecuación 1. Representación matemática del concepto de aberración de onda, como la suma de todos los valores para cada punto de la pupila.

Se pueden representar matemáticamente, de manera más sencilla, mediante una función que consiste en descomponer la aberración de onda en una suma de polinomios denominados polinomios de Zernike.

### 2.3.1. Polinomios de Zernike

Corresponden a funciones que se miden normalmente en coordenadas polares  $(\rho, \theta)$  cuyo peso en la aberración viene determinado por el coeficiente  $Z_n^m$  que las multiplican. Refiriéndonos a las coordenadas polares, “ $\rho$ ” es la coordenada radial normalizada, y “ $\theta$ ” es el componente azimutal. La ecuación mediante la cual se pueden representar los polinomios de Zernike es la siguiente:

$$Z_n^m(\rho, \theta) = \begin{cases} N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \cos m\theta ; \text{ for } m \geq 0 \\ -N_n^m R_n^{|m|}(\rho) \sin m\theta ; \text{ for } m < 0 \end{cases}$$

Ecuación 2. Representación matemática de los polinomios de Zernike.

El polinomio se identifica con dos índices, n y m. Esquemáticamente  $Z_n^m$  dónde:

- “n” indica la potencia más alta (orden radial). Indica el orden de la aberración y siempre es un valor positivo. En la Fig. 7 se ve como las aberraciones de una misma fila, que corresponden a un mismo orden de aberración, se identifican con el mismo valor de “n”.
- “m” es la frecuencia angular o azimutal: cuanto mayor es este valor, más periférica será la aberración. Puede tener valores positivos o negativos. En la Fig. 7 se ve como las aberraciones centrales, presentan un valor de  $m = 0$ , haciendo referencia a un eje vertical, las que se encuentran a la izquierda presentarían valores negativos, y las que se encuentren a la derecha, valores positivos.

Los polinomios de Zernike los podemos clasificar ordenándolos sistemáticamente en un mapa con códigos de colores, denominado mapa aberrométrico, con forma de pirámide. Cada fila de la pirámide corresponde a un **orden** dado del componente polinomio de la función (n) y cada columna a una **frecuencia** meridional diferente (m). Los distintos colores que se muestran en cada tipo de aberración, representan el avance o el retroceso del frente de onda respecto al frente de onda ideal.

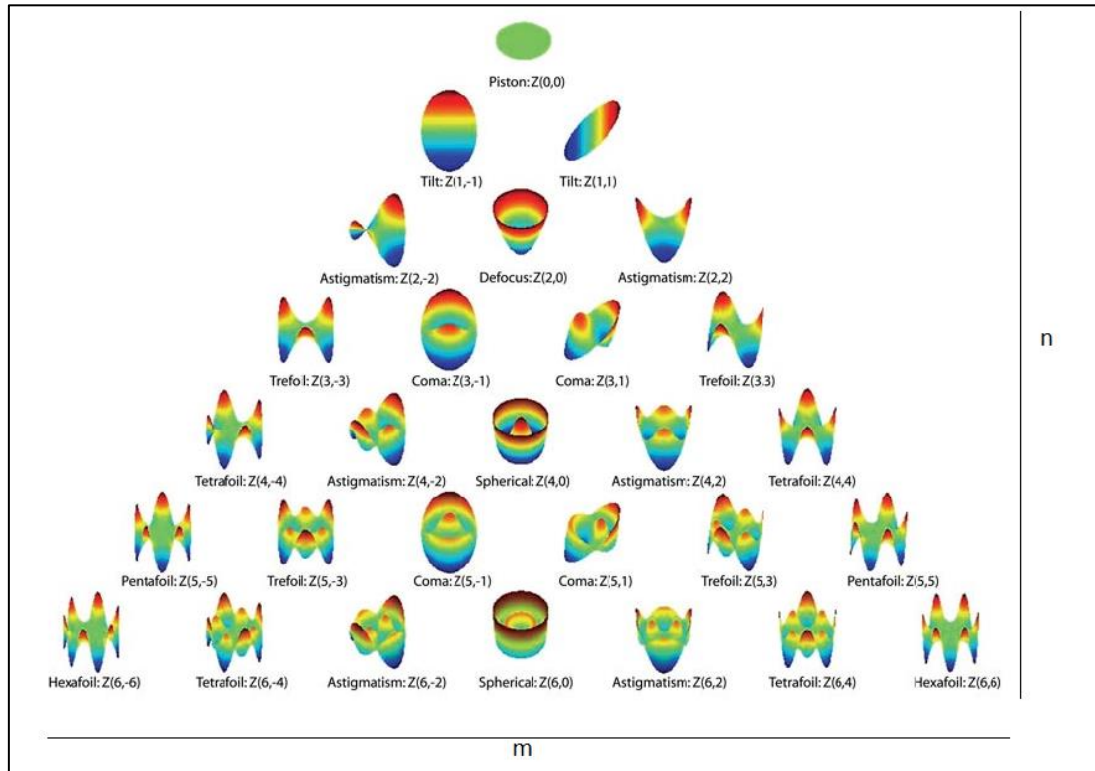


Fig. 7. Representación de la pirámide de los polinomios de Zernike, mediante un mapa de colores. La gama del verde representa un nivel cero de medida en micras y poco o ningún error aberrométrico. Los colores fríos muestran el frente de onda lento o más atrasado con respecto al plano ideal. Los colores calientes representan el frente de onda lento o más rápido con respecto al plano de referencia cero (Vidal 2011).

Las aberraciones que afectan en mayor grado la calidad visual se ubican en la posición central de la pirámide, más cercanas al valor  $m = 0$ ; por el contrario, las que se concentran cerca del borde con mayores valores de  $m$ , no tienen una afectación muy marcada en la calidad de la imagen retiniana.

Además de los polinomios de Zernike, con objeto de cuantificar las aberraciones oculares, se utiliza el concepto *Root mean Square* (RMS), conocido como valor cuadrático medio. Se trata de una medida estadística usada para calcular la medida de diversas variables, en este caso la media de las aberraciones que se quieren analizar basándose en los polinomios de Zernike, por lo que entenderemos el valor de RMS como la diferencia entre el frente de onda real y el frente de onda ideal, para un orden determinado, para un conjunto de órdenes, para un conjunto de aberraciones que se quiera estudiar, etc.

$$RMS_{HOA} = \sqrt{(Z_3^{-3})^2 + (Z_3^{-1})^2 + (Z_3^1)^2 + (Z_3^3)^2 + (Z_4^{-4})^2 + (Z_4^{-2})^2 + \dots + (Z_6^4)^2 + (Z_6^6)^2}$$

Ecuación 3. RMS de las aberraciones de alto orden.

### 2.3.2. Cuantificación de la calidad visual

A parte de la representación matemática de las aberraciones, mediante los polinomios de Zernike, existen otros parámetros que también pueden especificar cuantitativamente la calidad de la imagen retiniana que evidentemente dependen también del efecto de las aberraciones:

- *Point spread function* (PSF): Se define como la distribución de la energía de la imagen de un punto después de atravesar un sistema óptico (Fig. 8).

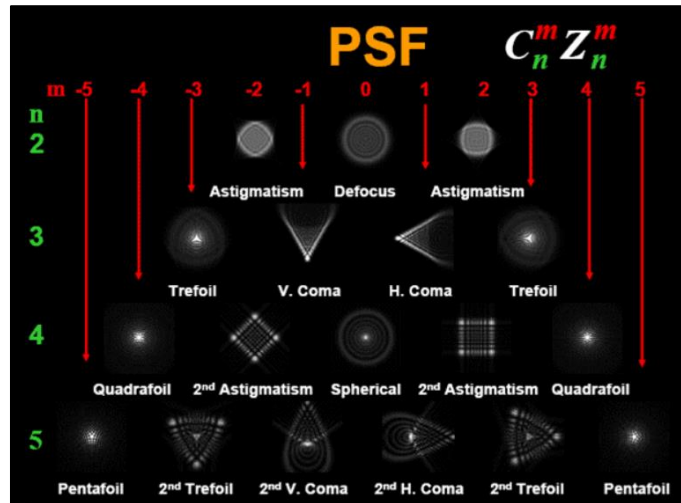


Fig. 8. Mapa en escala de grises de la función de dispersión de punto en cada uno de los polinomios (Vidal 2011).

- *Modulation transfer function* (MTF): Proporciona la pérdida de contraste entre el objeto y la imagen obtenida de un patrón sinusoidal de contraste unidad y con una frecuencia determinada al atravesar un sistema óptico (Fig. 9). Se encuentra relacionado con la sensibilidad al contraste CSF que se puede determinar clínicamente.

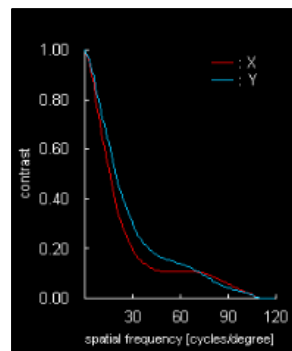


Fig. 9. Pérdida de contraste al aumentar la frecuencia espacial de dos direcciones x e y. (Topcon 2013)

## 2.4. INSTRUMENTOS DE MEDIDA DE LAS ABERRACIONES

Podemos tener una idea de cómo es la calidad de la imagen retiniana con medidas psicofísicas, como son la agudeza visual (AV) y la sensibilidad al contraste (CSF), métodos totalmente subjetivos que requieren la colaboración del paciente. Pero estos dos métodos no van a permitir identificar y cuantificar aberraciones que presenta un determinado ojo.

Aunque no nos es posible acceder físicamente al espacio imagen de nuestros ojos, los avances tecnológicos nos han permitido obtener diferentes técnicas objetivas que nos permiten medir y cuantificar las aberraciones oculares, haciendo posible obtener una medida fiable y precisa.

Existen dos técnicas para medir las aberraciones de frente de onda en el ojo: Éstas son: trazado de rayos láser y Hartmann-Shack. Ahora haré una breve descripción de cada una de las dos técnicas y más adelante me centraré solamente con la técnica Hartmann-Shack que es la que utilizaré para realizar este estudio.

### Trazado de rayos

Es un sistema que proyecta sobre la retina un dispositivo láser capturando secuencialmente en diferentes posiciones, la pupila del paciente y obteniendo simultáneamente imágenes retinianas en una cámara CCD (Fig. 10).

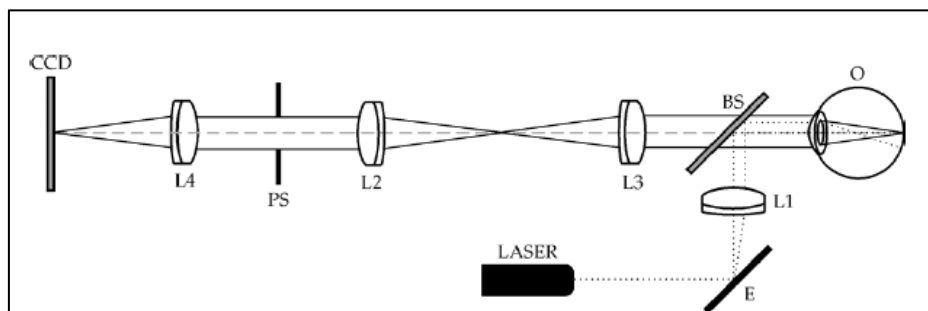


Fig. 10. Esquema de la técnica de trazado de rayos láser (Martínez 2010).

Un aberrómetro basado en la técnica de Trazado de rayos láser es el I-trace, utilizado en estudios actuales como: *Estudio sobre aberraciones oculares y queratoconos* (Izquierdo 2011)

### Hartmann-Shack:

Es un sistema que mide las desviaciones del frente de onda mediante el registro de una única imagen del plano focal a la salida del ojo.

El objeto puntual utilizado está formado por una luz láser que forma su imagen en la retina, esta imagen será el objeto para el segundo paso. Una matriz de microlentes (MM) será la que

hará focalizar el haz de luz proveniente de la retina en múltiples imágenes que se capturarán en una cámara CCD (Fig. 11).

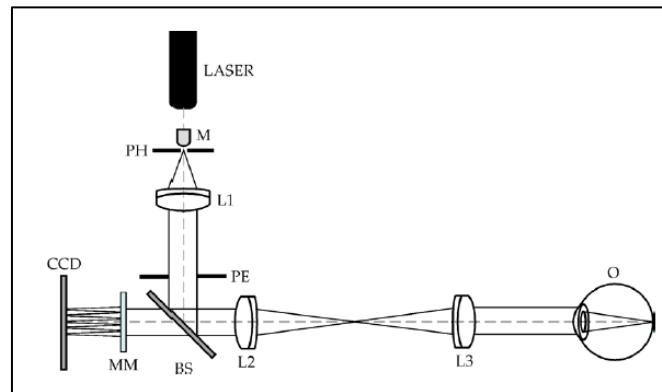


Fig. 11. Esquema de la técnica Hartmann-Shack (Martínez 2010).

Como se ha comentado, la técnica Hartmann-Shack será la utilizada a lo largo de este estudio para la medida de las aberraciones oculares. El aberrómetro empleado en nuestro estudio, el Topcon KR-1W, utiliza este tipo de técnica.

### Otros métodos para valorar la calidad óptica de la imagen

Además de estas dos técnicas utilizadas para evaluar las aberraciones, también existe otro tipo de técnica basada en el **doble paso** que nos permite capturar toda la información de la imagen óptica del ojo, no solo las aberraciones que presenta, sino que también tiene en cuenta la difusión y difracción.

La técnica de doble paso consiste en la formación, en un primer paso, de una imagen en la retina después de la proyección de un haz de luz láser utilizado como objeto puntual. A la salida, esta imagen se convierte en el objeto del segundo paso. A diferencia de la técnica Hartmann-Shack, en vez de una matriz de microlentes, utiliza una sola lente que focaliza el haz de luz en una cámara CCD donde se obtiene toda la información de la calidad óptica de la imagen formada en la retina (Fig. 12).

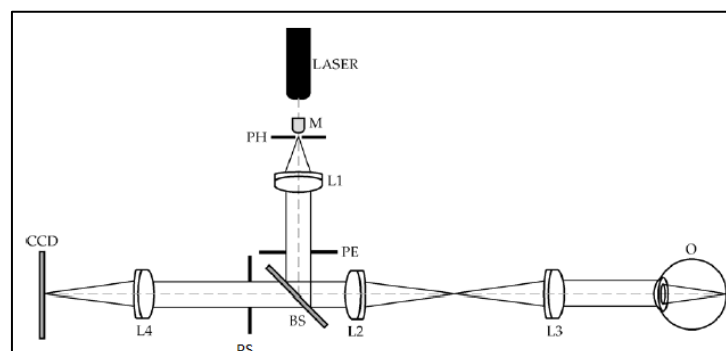


Fig. 12. Esquema de un sistema de doble paso (Martínez 2010).

Un instrumento que utiliza la técnica de doble paso, es el OQAS, utilizado en numerosos estudios, entre ellos: *Normalización de los resultados de calidad óptica ocular proporcionados por OQAS* (Martinez 2010).

## 2.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN LAS ABERRACIONES

Como he comentado anteriormente, existen diversos factores por los que la cantidad de aberraciones en un mismo individuo pueden ser diferentes.

### **Diámetro pupilar**

El diámetro pupilar determina la cantidad de luz que puede entrar al interior de nuestro ojo. Cuanto menor sea este diámetro la cantidad de luz que percibimos es menor; y si el diámetro es mayor recibimos mayor cantidad de luz.

El tamaño del diámetro pupilar está regulado mediante el iris que, con ayuda de dos músculos el dilatador y el esfínter del iris, puede hacer variar el tamaño de ese diámetro. Si iluminamos el ojo con mayor cantidad de luz, el diámetro pupilar tiende a disminuir (miosis) en cambio, si nos encontramos en un lugar poco iluminado, el diámetro pupilar tiende a aumentar (midriasis).

Según numerosos estudios, podemos ver que cuanto mayor sea el diámetro pupilar la cantidad de aberraciones producidas también será mayor (Wang et al 1995; Applegate et al 2007). En el estudio experimental que presentaremos se tendrá en cuenta el diámetro pupilar, observando qué cambios se establecen en la muestra de población seleccionada.

### **La acomodación**

Interviene también en el valor de las aberraciones porque, por mero hecho de estar acomodando, estamos variando la geometría del cristalino, haciendo variar su forma y posición según a la distancia en la que observamos un determinado objeto.

Según estudios realizados, se ha observado que sobre todo la aberración esférica (4, 0) cambia en función de la acomodación (Radhakrishnan 2007). Aunque pueden existir diversas excepciones según el tipo y orden del tipo aberración (esférica, coma...).

### **La excentricidad**

Se ha demostrado que en la fóvea, donde se presenta una mejor AV, las aberraciones son menores que en otros puntos de retina periférica y que aumentan, conforme nos alejamos del área macular, principalmente las aberraciones de segundo orden (desenfoque y astigmatismo) y el coma (Guirao et al 1999).

### **La edad**

Conforme pasan los años, la fisiología de nuestro ojo realiza diferentes cambios debido al propio envejecimiento. Los diferentes medios por los que pasa la luz al entrar en nuestro ojo



pierden transparencia, además de producirse cambios en el radio de curvatura del cristalino, todo esto hace que la calidad visual de las imágenes que llegan a nuestra retina no sea tan precisa. El valor de RMS total para las aberraciones de alto orden aumenta con la edad según diversos estudios de varios autores, (MClellan et al 2001; Radhakrishnan et al 2007; Berrio et al 2010). Radhakrishnan et al demostraron que a órdenes mayores de aberraciones el aumento que se presenta según edad es significativo. Berrio et al demostraron que el aumento de RMS en aberraciones de alto orden para personas de avanzada edad que se debe principalmente a los cambios producidos en el cristalino, que rompen el equilibrio de compensación existente entre las aberraciones corneales y las internas. La edad será el factor principal de análisis en el presente estudio, por lo que en el presente trabajo dividiremos la muestra de población en dos rangos de edad diferentes.

## 2.6. CAMBIOS FISIOLÓGICOS DEL OJO CON LA EDAD

Los cambios estructurales y funcionales se producen a lo largo de toda la vida del individuo, pero es a partir de cierta edad cuando notamos que el cuerpo humano empieza a envejecer y se producen cambios en órganos y tejidos; con el tiempo empieza a disminuir también la actividad funcional.

Aunque con el paso de los años todos vamos a envejecer, existen diferencias en el grado de afectación según el órgano o tejido del que se trate, y también va a depender de cada individuo en concreto. En este apartado se hablará de los cambios que se producen en el órgano visual.

Cada una de las estructuras del órgano ocular envejece con los años (párpados, cristalino, lágrima, iris...) pero aquí se hablará solamente de los cambios que pueden afectar a la calidad visual, específicamente a las aberraciones oculares. Estos son: sistema lagrimal, cornea, pupila, humor acuoso, humor vítreo, retina.

**El sistema lagrimal:** Las personas de edad avanzada suelen tener mayores síntomas de ojo seco que cuando eran jóvenes. Esto es debido a que el propio envejecimiento produce una atrofia de la glándula lagrimal y de las glándulas de Meibomio, segregando menor cantidad de lágrima. El efecto de la lágrima produce un cambio en las aberraciones ya que diferentes estudios muestran una disminución, sobre todo de aberración esférica y de coma, en individuos con el síndrome de ojo seco después de la instilación de lágrimas artificiales. (Montés 2006; Karpecki 2012).

**La cornea:** Pierde parte de su transparencia debido a la pérdida o cambio de tamaño de las células endoteliales, (polimorfismo o polimegatismo). También es frecuente encontrar depósitos de lípidos cercanos a la zona del limbo, en forma circular formando lo que se denomina arco senil. Según diversos estudios, se ha demostrado que el cambio de las aberraciones corneales con la edad es menor que el cambio de las aberraciones totales. Así, se encuentra que, las aberraciones totales son más bajas que las aberraciones corneales en sujetos jóvenes y lo contrario en sujetos de mayor edad (Artal et al 2002).

**La pupila:** Tiende a disminuir con el envejecimiento y se denomina miosis senil. El efecto beneficioso de este hecho es que la miosis senil reduce el efecto de las aberraciones ópticas monocromáticas e incrementa la profundidad de foco, por lo que en condiciones naturales del diámetro pupilar para una iluminación dada, la diferencia de aberraciones entre una población joven y una población de mayor edad podría llevar a que no se muestren diferencias significativas (Guirao 1998).

**Humor acuoso:** Se produce un descenso en el drenaje del humor acuoso a través de la red trabecular y el flujo úveo-escleral, lo cual contribuye a un aumento de la presión intra-ocular y la predisposición a alteraciones o patologías como el glaucoma (Gabelt 2005).

**Cristalino:** Con la edad se producen diferentes cambios bioquímicos en su geometría y se pierde también la transparencia, llegando incluso a opacificarse, hecho que se conoce con el nombre de cataratas. Además de la pérdida de transparencia, el cristalino también sufre una pérdida de elasticidad, se vuelve más rígido y aumenta de espesor, haciendo que el ojo no sea capaz de realizar enfoques en objetos situados en visión cercana, es decir, se produce una pérdida de acomodación que es lo que denominamos presbicia. Según diversos estudios, como se ha comentado en el cambio de la córnea, el hecho de que en la población joven las aberraciones corneales sean menores que las aberraciones totales es debido a una compensación producida por el cristalino, por ser la aberración esférica de signo contrario. Con el paso de los años, y debido a los cambios producidos en el cristalino, la aberración esférica interna tiende hacia un valor negativo, aumentando así las aberraciones totales. (Artal et al 2002; Guirao 1998).

**Humor vítreo:** El vítreo sufre una licuefacción con la edad, al mismo tiempo que se produce un cambio en las fibras de colágeno, con una ligera pérdida de transparencia que pueden provocar las llamadas miodesopsias o “moscas volantes”. Este hecho, más que directamente con las aberraciones, se relaciona con la calidad visual generalizada del ojo (Sebag 1994).

**Retina:** En la retina hay un deterioro del epitelio pigmentario y de la membrana de Bruch; y además, se produce una pérdida de fotorreceptores, principalmente los conos, produciendo una pérdida de agudeza visual con el paso de los años. Así mismo, no olvidemos el riesgo de enfermedades retinianas que se pueden presentar por el propio envejecimiento, como la degeneración macular asociada a la edad (DMAE).

### **3. OBJETIVOS**

#### **2.1. OBJETIVO GÉNÉRICO DEL ESTUDIO**

El objetivo genérico de este trabajo es hacer un estudio de las aberraciones oculares de alto orden, totales y corneales, en dos muestras de diferente rango de edad y hacer un análisis comparativo entre los resultados obtenidos.

#### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL ESTUDIO**

Estudiar, según los resultados de las medidas realizadas para las diferentes muestras, los siguientes factores:

- Efecto del diámetro pupilar en condiciones de alta (fotópica) y baja (escotópica) iluminación sobre las aberraciones oculares totales y corneales.
- Efecto de la edad en las aberraciones oculares al comparar un grupo de jóvenes con otro de personas de más edad, controlando el factor del diámetro pupilar.
- Estudio de las aberraciones totales y corneales en los dos grupos de edad comentados.

#### **2.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS PERSONALES**

Adquirir nuevos conocimientos sobre el concepto de aberraciones oculares, en la manipulación de un aberrómetro y en la interpretación de los resultados.

## 4. INSTRUMENTACIÓN Y METODOLOGÍA

Trataremos de explicar en este apartado el instrumento utilizado para la realización de la medida de las aberraciones, los principios éticos que hay que seguir en la metodología, cómo se ha realizado la selección de muestra y finalmente, cómo ha sido el protocolo de medida.

### 4.1. INSTRUMENTACIÓN: ABERRÓMETRO TOPCON KR-1W

El aberrómetro utilizado en este estudio, como se ha comentado anteriormente, se basa en la técnica Hartmann-Shack y es uno de los sistemas de medida de aberraciones oculares más utilizados hoy en día en el ámbito clínico y en investigación de diversos estudios para el análisis y cálculo de las aberraciones (Fig. 13).

A diferencia de un sistema de doble paso, la técnica Hartmann-Shack tiene una matriz de microlentes las cuales focalizan múltiples imágenes que se capturan en una cámara CCD. Además, únicamente tiene en cuenta las aberraciones y no nos permite obtener información de los otros dos factores que influyen en la degradación de la calidad óptica de la imagen: la difracción y la difusión.



Fig. 13. Instrumentación: Aberrómetro Topcon KR-1W

#### 4.1.1. Descripción y funcionamiento de Topcon KR-1W

Es un instrumento comercializado por la empresa Topcon que permite realizar diversas funciones como el análisis del frente de onda para obtener las aberraciones, la topografía y queratometría corneal, la pupilometría en distintas condiciones de iluminación y la refracción objetiva.

Se obtienen resultados simultáneos de las aberraciones totales del ojo y corneales debido a la incorporación del disco de plácido para la topografía corneal. El hecho de tener ambos sistemas incluidos en uno mismo permite hacer una estimación más exacta de las aberraciones

internas ya que las dos técnicas realizan las mediciones en el mismo momento y eje de referencia (Piñero et al 2011).

Existe la posibilidad de variar el tamaño de la pupila cambiando la iluminación del test de fijación.

Una de las ventajas de este equipo reside en la captura simultánea de todas las pruebas, lo que se traduce en una correlación de todas ellas ya que son capturadas al mismo tiempo con el mismo centrado.

La finalidad de esta técnica es obtener una serie de imágenes resultantes que nos den la información de qué aberraciones están presentes en el ojo humano.

Utilizamos un esquema para explicar el recorrido que hace el láser como objeto puntual hasta llegar a la retina y posterior salida del ojo hasta que las imágenes son capturadas en una cámara CCD (Fig. 14).

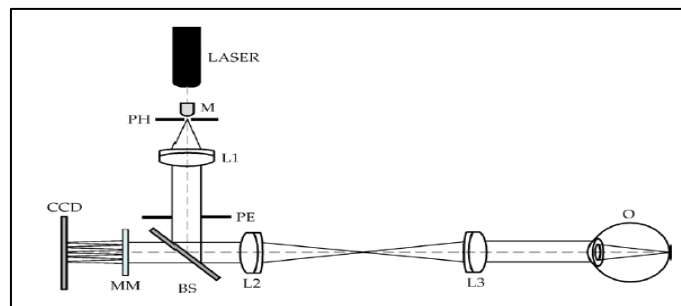


Fig. 14. Esquema de la técnica Hartmann-Shack (Martínez 2010).

En el primer paso, utilizamos un láser como objeto puntual que pasa a través del objetivo del microscopio (M) y de un filtro espacial (PH) enviando los rayos de luz a una lente L1 que colimará los rayos hasta llegar a un divisor de haces de luz (BS) el cual dirigirá el haz al sistema de Badal (L2 y L3) hasta que llegue la luz a la retina del paciente y se forme la imagen.

La imagen formada en la retina del paciente, será el nuevo objeto puntual de la trayectoria del haz de luz a la salida del ojo, el cual volverá a pasar por todo el sistema hasta que llegue a la matriz de microlentes (MM) que se encuentran en el plano conjugado de la pupila. Cada microlente formará una imagen que será capturada en una cámara CCD, cada imagen formada se corresponderá con las diferentes regiones de la pupila del paciente.

La imagen que se obtiene a la salida del haz de luz de la matriz de microlentes se conoce como imagen Hartmann, representada en la siguiente fotografía:

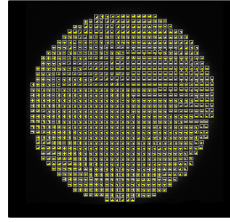


Fig. 15. Imagen de Hartmann-Shack (Topcon 2013)

Además de la formación de una imagen en la retina para obtener la imagen Hartmann, este instrumento también nos permite determinar la topografía y queratometría corneal gracias a la proyección de un anillo de Plácido en la córnea, la imagen de ello se obtiene mediante el reflejo de la superficie corneal y es capturada simultáneamente con la imagen Hartmann, en la cámara CCD.

La función simultánea de ambos, como se ha comentado, no solo permite obtener la anomalía de frente de onda del ojo total, sino que también nos permite obtener la corneal, pudiendo así simular las aberraciones internas del ojo, mayoritariamente aberraciones del cristalino, valores muy útiles ante una cirugía de cataratas.

#### 4.1.2. Descripción del programa y de la captura de datos del aberrómetro Topcon KR-1W

El instrumento presenta una pantalla táctil donde indicaremos toda la configuración necesaria de las medidas que queremos realizar y la entrada de datos del paciente, antes de empezar con la prueba.

**La pantalla de inicio**, o panel de control (Fig. 16), permite llevar a cabo varias operaciones y ajustes, además de la observación directa del ojo del paciente que se quiere observar.

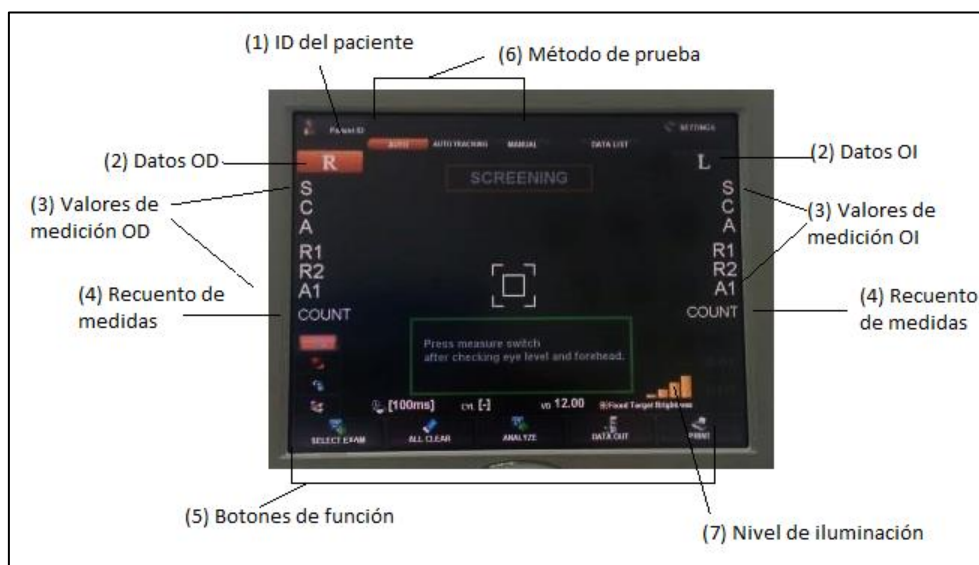


Fig. 16. Captura de la pantalla en la pantalla de inicio en el aberrómetro Topcon KR-1W.

- (1) ID del paciente: Aparece la pantalla del número de identificación del paciente.
- (2) Indica la zona donde se indican los datos de cada ojo, OD u OI. Pulsando en el mismo botón se puede elegir en qué ojo se desean hacer las medidas, en uno de ellos o en ambos.
- (3) Valores de medición de cada uno de los ojos. Se muestran los valores de refracción, cilindro, eje y la queratometría de ambos ojos.
- (4) Se visualiza el recuento de las medidas realizadas en cada ojo.
- (5) Botones de función: Permiten cambiar configuración de medición, borrar datos, ver resultados de la prueba o imprimir valores de refracción.
- (6) Método de prueba: A elegir entre automático, Auto-Tracking (centrado automático y disparo manual), o manual.
- (7) Nivel de iluminación. Permite cambiar la luminancia del test de fijación para poder realizar medidas con diferente tamaño pupilar.

El aberrómetro Topcon KR-1W realiza las mediciones mediante la captura de imágenes Hartmann y Plácido de ambos ojos. Al finalizar la medición en un paciente, se extraen los datos de las imágenes obtenidas y se consiguen los resultados pudiendo acceder a la representación de diversos mapas donde se podrán visualizar los resultados de medición.

En la mayoría de los casos, pero dependiendo de las opciones elegidas al realizar la prueba, podemos obtener 8 o 9 mapas diferentes y un décimo mapa personalizado que diseña por el propio examinador.

El **mapa múltiple**, nos permite obtener un resumen de las medidas realizadas es el que nos describe la mayoría de información, por lo que es conveniente explicarlo con ayuda de una imagen.



Fig. 17. Captura de pantalla del mapa múltiple obtenido con el aberrómetro Topcon KR-1W.

Este anterior mapa (*Fig. 17*) nos indica los valores de un solo ojo, en este caso ojo derecho (indicado en la parte superior izquierda). De todas las medidas realizadas simultáneamente en un mismo ojo, ésta es la medida número dos (indicado también en la parte superior izquierda). El mapa está compuesto por diferentes partes explicadas a continuación:

- (1) Imagen de mira: Imagen de la superficie de la córnea que se observa al realizar las medidas. A partir de esta imagen se analizan las mediciones relacionadas con la córnea, podemos observar en la parte inferior de la imagen la fecha en la que se ha realizado la medida, y el tamaño del diámetro pupilar.
- (2) Mapa de potencia axial: Este mapa de colores muestra la distribución de la potencia refractiva de la córnea, de donde se obtienen los valores queratométricos.
- (3) Mapa AAO corneal: Este mapa de colores muestra las aberraciones corneales de alto orden. En la tabla inferior a la imagen de mira, se pueden observar los diferentes valores de RMS para los diferentes órdenes de aberraciones corneales de alto orden, según los valores de pupila 4 y 6 mm y el tamaño real de la pupila del paciente.
- (4) Imagen de Hartmann: Imagen formada por la matriz de microlentes, de un punto que se refleja desde la parte ocular interna a través de la pupila. A partir de esta imagen, el instrumento calcula los valores de refracción ocular y las aberraciones de alto orden.
- (5) Mapa de aberraciones oculares: Incluye tanto las aberraciones de bajo orden, como las de alto orden totales del ojo.
- (6) Mapa AAO ocular: Este mapa de colores muestra las aberraciones oculares de alto orden totales del ojo, en la tabla inferior a la imagen Hartmann, se pueden observar los diferentes valores de RMS para los diferentes órdenes de aberraciones oculares de alto orden, según los valores de pupila 4 y 6 mm y el tamaño real de la pupila del paciente.
- (7) Simulación de la E de Snellen: Muestra una simulación de cómo el paciente ve la E de Snellen, corregido su error refractivo, y solamente teniendo en cuenta las aberraciones de alto orden.

Sobre el resto de mapas:

Los dos siguientes mapas que se nos presentan nos dan los mismos datos que el anterior, pero separando un mapa con toda la información de las aberraciones oculares, y otro mapa con toda la información de las aberraciones corneales.

El cuarto mapa, llamado mapa de componentes, nos muestra las aberraciones de alto orden para todo el ojo, para la córnea y para los medios internos.

El mapa de resumen tiene en cuenta solamente las aberraciones de alto orden, y realiza un seguimiento cuando se han realizado varias medidas simultáneamente en un mismo ojo, pudiendo observar la variación entre medidas representadas en una gráfica.

El mapa de vector de Zernike elige las aberraciones de alto orden más significativas, detallando el mapa de colores y valor numérico para cada tipo. (Coma, trefoil, tetrafoil, segundo astigmatismo, esférica)



El siguiente mapa es muy útil para la elección de la lente intraocular (LIO) en operaciones de cataratas, llamado mapa de selección IOL, el cual tiene en cuenta las aberraciones corneales e internas, para así poder corregir al máximo las aberraciones presentes en el momento de la colocación de la LIO.

El mapa PSF/MTF muestra la simulación de cómo sería la imagen de un punto luminoso formada en nuestra retina. Presenta también una gráfica MTF donde se observa la pérdida progresiva de contraste al aumentar la frecuencia espacial.

El mapa de pupilometría, solo estará disponible, en el caso de la elección de realizar las medidas teniendo en cuenta la iluminación del test, para producir variaciones en el tamaño de la pupila, dentro de las mismas medidas, comparando entre ellas el diámetro pupilar, la refracción, y valores de las aberraciones oculares.

Así mismo existe la opción de realizar mapas personalizados, donde se pueden hacer comparaciones entre ambos ojos tanto de la información obtenida mediante Plácido como de la información obtenida mediante la imagen de Hartmann.

Como se puede ver, el aberrómetro Topcon KR-1W nos ofrece una variación muy amplia de analizar los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, de manera que cada vez más aplicado a casos clínicos, como es el caso del mapa de selección IOL.

### **4.1.3. Repetitividad de Topcon KR-1W**

Es importante que un instrumento nos proporcione cierta fiabilidad en la medición y una cierta repetitividad a la hora de realizar la prueba, obteniendo valores muy similares entre la toma de varias medidas consecutivas, en un mismo paciente y con las mismas condiciones.

Este instrumento ofrece una buena precisión y fiabilidad en las medidas de refracción, ya que está aprobado utilizarlo como tal, por lo que en todo momento nos basaremos en el estado refractivo del paciente según resultados del aberrómetro.

En cuanto a las medidas aberrométricas, los estudios realizados con Topcon KR-1W muestran una muy buena repetitividad en medidas. Aunque la repetitividad es mayor en pupilas de menor diámetro (4mm), podemos considerar buenos valores de repetitividad también en diámetros mayores (6mm), y para todos los órdenes de la pirámide de polinomios de Zernike. (Piñero et al 2011)

## **4.2. CONSIDERACIONES ÉTICAS A TENER EN CUENTA**

Antes de realizar cualquier tipo de investigación, se deben conocer los requisitos éticos, legales y jurídicos especialmente cuando la investigación se realiza en seres humanos. La Asociación Médica Mundial (AMM) ha promulgado la Declaración de Helsinki como una propuesta de principios éticos para investigación médica en seres humanos, incluida la investigación del

material humano y de información identificable. Es por ello por lo que el presente estudio se basará en la declaración de Helsinki.

La declaración de Helsinki es un documento internacional muy importante en la ética de la investigación biomédica aplicable desde junio de 1964, y se utiliza cuando se llevan a cabo diversos estudios con seres humanos.

Se debe realizar una explicación del proyecto y del método, representados en un protocolo a seguir en el estudio, incluyendo el análisis de posibles riesgos y beneficios obtenidos en otros estudios semejantes. Este estudio queda excluido de cualquier riesgo, ya que en ningún momento las pruebas son invasivas, en ningún momento mantenemos contacto con el ojo del paciente.

Los individuos presentes en el estudio son individuos voluntarios, a los que se les ha explicado con anterioridad toda la información previa del estudio. En todo momento se respeta el derecho de los participantes, guardando su identidad y confidencialidad, así como respetando el derecho del participante a abandonar el estudio si lo encuentra necesario. El individuo habrá tenido que leer y firmar la hoja del consentimiento informado, donde se encontrará toda la información detallada. (Ver en anexo I).

Finalmente, antes de empezar con la realización de la prueba, nos aseguramos de que el paciente haya entendido toda la información dada y explicada; en caso afirmativo podremos empezar con la realización de la prueba. Igualmente se ha pedido el consentimiento para la recolección, análisis, almacenamiento, tratamiento y reutilización de los datos clínicos recogidos manteniendo en todo momento su exactitud y resultados obtenidos en la prueba.

#### 4.3. SELECCIÓN DE LA MUESTRA

Describiré en este apartado la selección de la muestra que se realizó entre febrero y abril de 2013. La finalidad de la búsqueda era encontrar pacientes con los ojos sanos para evaluar en ellos tanto las aberraciones del sistema óptico completo como las aberraciones corneales.

Se establecieron diversas pautas a tener en cuenta antes de hacer la selección de la muestra y diversas condiciones que deberían cumplir los voluntarios:

- Tener entre 18 y 25 años, o ser mayor de 50 años.
- Presentar un error refractivo entre +6,00/-6,00 D.
- No presentar un astigmatismo superior a -2,00 D.
- No ser usuario de lentes de contacto RPG.
- En el caso de ser usuario de lentes de contacto blanda, que cuyo último uso haya sido anterior a las 48 horas de realización de la prueba.
- No haber estado sometido a cirugía ocular.
- No utilizar fármacos oculares a excepción de lágrimas artificiales. En este caso, el tiempo transcurrido desde su última instilación debe ser superior a tres horas.

- No se incluirán dentro de la prueba los pacientes con patologías oculares, tales como cataratas, glaucoma, queratocono...
- No presentar patología sistémica que pueda afectar a la función visual.

Con la finalidad de estos criterios iniciales de selección, se pasó un cuestionario previo a la citación de los voluntarios, evitando así que una vez realizada la prueba no fuesen válidos para el estudio (Anexo II).

Una vez seleccionados los voluntarios, los dividimos en dos poblaciones diferentes según el rango de edad al que pertenezcan, una primera muestra de pacientes entre 18 y 25 años, y una segunda muestra de pacientes mayores de 50 años.

Seguidamente se aplicaron los siguientes criterios de exclusión:

- Una agudeza visual monocular en VL, menor de 0,8 con la mejor corrección. Debido a que tratamos con una población sana el hecho de tener una visión inferior a 0,8 nos estaría indicando alguna alteración ocular.
- Un diámetro pupilar menor de 2mm en condiciones fotópicas. Con valores de pupila menores a 2 mm entra en acción el fenómeno de difracción. Puesto que el objetivo del presente trabajo son las aberraciones, necesitamos cumplir las condiciones del diámetro pupilar para ignorar la difracción.

#### 4.4. PROTOCOLO DE MEDIDA

Se explicará en este apartado la metodología utilizada al realizar la prueba.

Antes de citar al paciente para acudir como voluntario para efectuar las pruebas, se le realizan determinadas preguntas para saber si va a ser válido para el estudio o no. El cuestionario utilizado para ello se puede ver en anexo II.

El día de la realización de la prueba, se le explica al paciente las indicaciones. En primer lugar, se explica al paciente en qué consiste el estudio y su finalidad, junto con la entrega del consentimiento firmado para rellenar (anexo I). Posteriormente se anotan los datos en la ficha de registro del paciente (anexo III), y se completa con algunas preguntas más, para comprobar que han seguido las instrucciones que se les dio con anterioridad (por ejemplo, no utilizar las LC las últimas 48 horas).

Una vez el paciente asegura tenerlo todo claro y no presentar ninguna duda más, se pasa a tomar AV en VL con un optotipo convencional. Se tapa primero el ojo izquierdo, se toma la AV con su refracción habitual del OD y seguidamente se tapa el ojo derecho, y se toma la AV con su refracción habitual del OI.

A continuación, en el caso de que nuestro paciente utilice gafas, se mira su refracción con el frontocómetro.

Finalizado el proceso anterior, se sienta el paciente delante del aberrómetro se le comenta brevemente en qué consistirá la prueba y se le explica la posición que deberá adquirir durante la misma, dando especial importancia a la fijación del test durante su realización, a realizar los parpadeos naturales cuando lo necesite y a no retirarse de la posición inicial mientras se cambia la dirección del aberrómetro para medir el otro ojo.

Seguidamente, se introduce la ID del paciente y el nivel de iluminación del test en condición escotópica; el paciente coloca adecuadamente frente y mentón y se observa que la posición sea la adecuada, moviendo mentonera o subiéndolo o bajando mesa/silla para que el paciente se encuentre cómodo.

Se realiza la prueba empezando con el ojo derecho. Se hacen tres medidas consecutivas y a continuación se pasa al ojo izquierdo, para realizar tres medidas consecutivas más.

Se descansa durante dos minutos, mientras tanto se introducen los datos de la siguiente prueba. Se vuelve a introducir una nueva ID (Habrán dos ID diferentes por paciente, por comodidad del guardado de los datos). Esta vez se elige la iluminación alta del test para realizar la prueba en condición fotópica.

Se repite el proceso, después de comprobar que la colocación del paciente es la adecuada, se hacen tres medidas en el ojo derecho consecutivas y seguidamente se pasa a realizar las tres últimas medidas en el ojo izquierdo.

Algunos parámetros que hay que tener en cuenta del laboratorio son la temperatura, la humedad, y la iluminación. Para obtenerlos se realizaron varias medidas a lo largo de la parte práctica del estudio y se consiguieron resultados siempre entre el rango que se presenta en la *Tabla 1*.

	Valor máximo	Valor mínimo
Temperatura (°C)	22,5	19,7
Humedad (%)	36	48
Iluminación (lux)	25,30	19,8

Tabla 1. Resultados obtenidos en el laboratorio donde se realiza la parte práctica del trabajo. Temperatura (°C), Humedad (%) e Iluminación (lux).

En resumen, se ha obtenido una serie de medidas para cada uno de los individuos que participaron en el estudio, registradas en el ordenador conectado al aberrómetro. Se pueden ver en el anexo IV dos tablas con los valores que nos interesaran de cada individuo en concreto.

## **5. RESULTADOS**

En este apartado se presentarán los resultados más representativos obtenidos después de realizar la metodología descrita en el apartado anterior, pero primero se explicará la estadística utilizada para llegar a esos resultados, y la descripción de la muestra que ha participado en el estudio.

### **5.1. PROCESAMIENTO DE DATOS Y TRATAMIENTO**

Una vez realizadas las medidas de las aberraciones, mediante el aberrómetro Topcon Kr-1w, en toda la muestra, se guardan los valores obtenidos para cada paciente (Ver anexo IV) en un ordenador conectado al aberrómetro.

Para hacer posible el tratamiento de datos, las medidas realizadas y almacenadas por el instrumento se pasan a un archivo Excel, gracias a un programa cedido por la empresa. Esto conlleva una presentación de los datos que hace imposible su tratamiento puesto que se han realizado tres medidas para cada ojo, debido a la importancia en realizar más de una sola medida por pequeñas fluctuaciones que se pueden presentar por el efecto de la lágrima. Es por ello que en el Excel se crea una hoja para cada paciente. La finalidad de esta hoja de Excel será hacer una media de los tres valores obtenidos que se pasarán todos a un nuevo Excel en el que se contemplarán los valores de todos los sujetos de la muestra, con diferentes códigos, referenciando el rango de edad en el que se encuentran, el ojo, el sexo, iluminación y lugar de la medida de aberraciones (totales o corneales).

Este Excel se realizará tanto para condiciones normales del paciente (con el diámetro pupilar natural, según iluminación utilizada) como para el filtrado del valor de la pupila, utilizando para toda la muestra un valor de 4 mm.

Una vez obtenidos los dos Excel globales, exportaremos los valores al programa estadístico SPSS versión 19, el cuál utilizaremos para realizar el estudio comparativo de las diferentes variables de toda la muestra.

En este estudio las variables analizadas son variables cuantitativas que se pueden expresar mediante cantidades numéricas y en una escala continua, permitiendo hacer comparaciones tanto en condiciones diferentes (iluminación) como en individuos diferentes (edad), obteniendo en cada uno de ellos el valor medio aritmético de toda la muestra y el valor de desviación estándar.

Entendiendo como **media aritmética**, el valor característico de una serie de datos cuantitativos. Se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Entendiendo como **desviación estándar**, la medida que informa de la variación de distancias que tienen los datos respecto de la media aritmética.

La finalidad del trabajo es realizar una comparación de las diversas variables. Para ello se utilizará la prueba de la **t de Student**. Este concepto se aplica cuando la población estudiada sigue una distribución normal y permite comparar las diferencias entre sujetos o condiciones de las variables de estudio.

En el presente caso se utilizará la t de student para dos muestras dependientes: cuando estamos ante la comparativa de la diferencia de aberraciones en toda la muestra de población según diferentes tipos de iluminación y la t de student para dos muestras independientes, cuando estamos ante la comparativa de la diferencia de aberraciones respecto la edad.

El valor de p es una probabilidad que se utiliza para hacer referencia a si las diferencias estudiadas son estadísticamente significativas, o pueden considerarse fruto del azar. El rango de valores está comprendido entre 0 y 1. Se utilizará en el presente estudio el valor de  $p < 0,05$  como referencia. Valores de p inferiores a 0,05 indican que el resultado es estadísticamente significativo, que existe una probabilidad inferior al 5% de que la diferencia encontrada sea fruto del azar. En cambio, valores próximos a 1, indicaran que las diferencias encontradas son azarosas y no ponen de manifestó ninguna tendencia.

El presente estudio tiene un diseño observacional transversal.

## 5.2. DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA

Las medidas se realizaron en ambos ojos de los 48 voluntarios tanto hombres como mujeres, de la Universitat Politècnica de Catalunya. Dado que la finalidad del estudio es hacer un análisis comparativo de las aberraciones oculares según la edad, hemos tenido dos muestras de edades diferentes.

Siguiendo el protocolo de exclusión explicado en el apartado de metodología, todos los sujetos que finalmente han participado en el estudio estaban libres de cualquier patología, presentaban un diámetro pupilar mayor de 2mm en condiciones fotópicas y podían lograr una AV mayor de 0,8 con su corrección habitual hemos obtenido una muestra de 24 sujetos jóvenes y 24 sujetos mayores, no obstante cuatro personas quedaron descartadas del estudio en la fase del cuestionario previo, por patología o cirugía ocular. Seguidamente se describe la muestra en su totalidad y por grupos de edad.

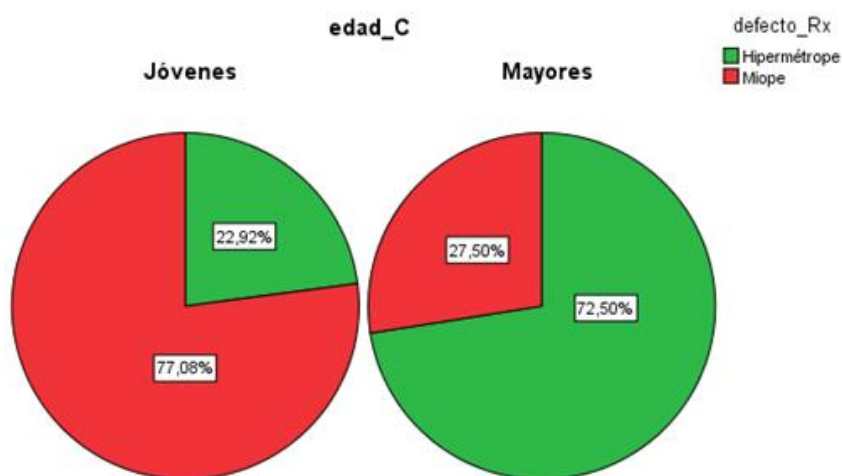
El porcentaje de hombres y mujeres presentes en el estudio es del 50 % de hombres frente al 50 % de mujeres, tanto en toda la muestra, como en los jóvenes y mayores por separado.

En la siguiente tabla, podemos ver un resumen de diferentes valores aplicados a toda la muestra: a la de jóvenes y a la de mayores. Para ello utilizaremos los valores de media aritmética y desviación estándar explicados en el apartado 5.1.

		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Toda la muestra	Edad	40,52 años	± 20,2	18	73
	Equivalente esférico	-3,27 D	± 1,85	-5,13	+4,50
Jóvenes	Edad	21,13 años	± 1,21	18	24
	Equivalente esférico	-0,97 D	± 0,25	-5,13	4,38
Mayores	Edad	59,9 años	± 7,38	50	73
	Equivalente esférico	0,44 D	± 0,27	-4,50	4,50

Tabla 2. Datos de la muestra utilizada en el estudio, incluyendo los valores medios, desviación estándar, valor mínimo y máximo.

Se ha calculado el equivalente esférico de la muestra seleccionada, como se puede ver en la *Tabla 2* la media de la población incluida en el estudio presenta un valor de error refractivo negativo con un mínimo de -5,13 y un máximo de +4,50, por lo que, según el protocolo de selección establecido, se encuentran todos incluidos en el estudio. Además ningún individuo presentaba un valor de astigmatismo mayor a -2D, solamente se ha analizado un ojo de valor de cilindro de -2,00 por lo que no ha habido exclusiones. En la siguiente gráfica se puede ver representado el porcentaje de miopes e hipermétropes, según el rango de edad.



Gráfica 1. Representación de los errores refractivos que presenta la muestra según el rango de edad.

### 5.3. ANÁLISIS PREVIOS A LOS RESULTADOS

Con la finalidad de poder trabajar con la información conjunta, lo primero que se ha planteado es ver si se pueden analizar conjuntamente los resultados obtenidos del ojo derecho y del ojo izquierdo como parte de la misma muestra. Diferencias estadísticamente significativas tan solo se han encontrado en algunos tipos de aberraciones de forma aislada como es la C31 perteneciente a la aberración de tipo coma del 3º orden, y a la aberración C4-4 perteneciente a la aberración Tetrafoil del 4º orden. Cuando se han comparado los valores de RMS, según el

orden de aberración, apenas se han encontrado diferencias importantes. Es por esta razón que creemos que podemos trabajar ambos ojos como conjunto. Es decir, utilizaremos los dos ojos de cada individuo en el análisis de resultados.

El mismo análisis se realiza en el caso de los sexos para ver si podemos trabajar conjuntamente uniendo los resultados de los hombres y de las mujeres, por lo que comparamos también tanto las aberraciones de los polinomios de Zernike hasta 6º orden como los resultados de RMS para cada uno de los órdenes. Las diferencias que se encuentran, son insignificantes salvo en el análisis de las aberraciones corneales en baja iluminación del grupo de los jóvenes, esto es debido a que en la muestra encontramos tres casos extremos, varones todos ellos, con un diámetro pupilar superior a 8 mm en los que los valores de las aberraciones en los tres casos son superiores a lo normal. Por el hecho de que solamente se encuentra esta particularidad se ve que este hallazgo no justifica el análisis por separado de los hombres con las mujeres, por lo que parece oportuno no diferenciar en el análisis entre hombres y las mujeres

De ahora en adelante, en la interpretación de los resultados, en todo momento se hablará de los resultados globales de cada uno de los órdenes representados en la pirámide de los polinomios de Zernike, y no individualmente de cada tipo de aberración por no crear monotonía en la interpretación de resultados. Si en algún momento existe algún valor significativo solamente en un polinomio de Zernike en concreto, se hará constar ese caso.

#### 5.4. ABERRACIONES TOTALES

##### 5.4.1. Aberraciones totales en función del diámetro pupilar

Los resultados de las aberraciones han sido obtenidos en las dos muestras con el tamaño pupilar en condiciones normales, sin ningún diafragma añadido y sin ningún tipo de midriático. Se subdividirá el apartado en tres categorías distintas, en primer lugar hablando de toda la muestra y después especificando entre jóvenes y mayores. Se comparará en cada uno de ellos los cambios de las aberraciones según la iluminación del test de fijación a la hora de realizar las medidas, obteniendo para un mismo individuo valores de pupila miótica, y valores de pupila midriática.

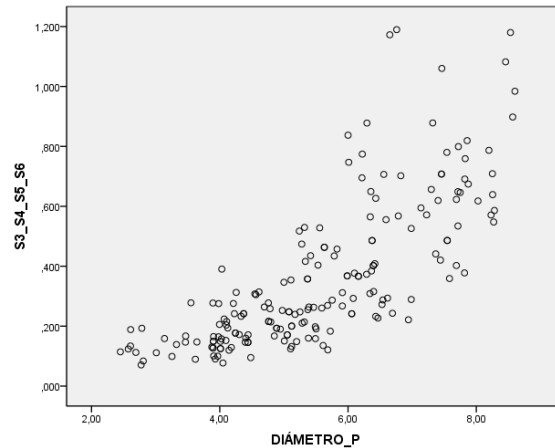
##### - Toda la muestra

En el anexo V se puede ver una tabla descriptiva con la media aritmética, desviación estándar, valor mínimo y valor máximo de las aberraciones totales para toda la muestra en cada orden de aberración; no obstante el valor de la media aritmética y desviación estándar se pueden ver también a continuación en otra tabla (*Tabla 3*) donde se hablará de la comparación entre iluminaciones.

En primer lugar comparamos las aberraciones según el diámetro pupilar. Para ello se han utilizado dos test de iluminaciones diferentes para cada individuo. En la siguiente gráfica (*Gráfica 2*) se puede ver la representación de las aberraciones totales de alto orden en función del diámetro pupilar, viendo un crecimiento de éstas conforme aumentamos el diámetro, este



crecimiento se incrementa a partir del tamaño de la pupila de 5 mm aproximadamente, la dispersión de puntos sigue el trayecto de una línea de regresión no lineal, que se ajusta más a una de tipo exponencial.



Gráfica 2. Gráfico de dispersión de puntos. Muestra el aumento del RMS de las aberraciones totales de alto orden en función del diámetro pupilar.

Después de observar la representación en forma de gráfica y tener una idea orientativa de la dependencia de las aberraciones con el tamaño del diámetro pupilar, se puede ver en la siguiente tabla (Tabla 3) cómo en todos los casos, el valor de RMS para cada orden de aberración es mayor en condiciones de baja iluminación, siendo resultados estadísticamente significativos por presentar todos los casos un valor de  $p = 0,000$ . Este hecho nos muestra la directa dependencia que existe entre las aberraciones oculares totales y el tamaño del diámetro pupilar.

ABERRACIONES TOTALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Toda la muestra	$\phi$ pupilar	6,406 $\pm 1,344$	4,658 $\pm 1,072$	1,748	1,402	2,095	0,000
	S3	0,404 $\pm 0,203$	0,165 $\pm 0,083$	0,239	0,194	0,283	0,000
	S4	0,272 $\pm 0,174$	0,097 $\pm 0,051$	0,175	0,138	0,211	0,000
	S5	0,099 $\pm 0,071$	0,045 $\pm 0,027$	0,054	0,038	0,069	0,000
	S6	0,070 $\pm 0,035$	0,035 $\pm 0,014$	0,035	0,027	0,042	0,000
	S HOA	0,517 $\pm 0,251$	0,205 $\pm 0,093$	0,312	0,258	0,366	0,000

Tabla 3. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en toda la muestra en baja y alta iluminación. S3: RMS para tercer orden. S4: RMS para cuarto orden. S5: RMS para quinto orden. S6: RMS para sexto orden. S HOA: RMS para aberraciones de alto orden.

De los valores de la columna de las diferencias se puede hacer una lectura más aplicada. Vemos que, para todos los órdenes de aberración, la aberración en baja iluminación es mayor del doble de la aberración en alta iluminación.

Después de ver los resultados obtenidos con la variación de iluminación para toda la muestra, separamos la población en dos grupos diferentes según el rango de edad, jóvenes y mayores analizando también la influencia de las aberraciones totales con el tamaño pupilar.

#### - Jóvenes

En el caso de los jóvenes, se puede ver también una tabla descriptiva en el anexo V, pero en la siguiente tabla también se muestran los valores de la media aritmética y desviación estándar para cada orden de aberraciones totales tanto en baja como en alta iluminación.

Comparación de las aberraciones totales según el tipo de iluminación en la muestra de jóvenes (Tabla 4).

ABERRACIONES TOTALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Jóvenes	$\phi$ pupilar	7,345 $\pm 0,870$	5,331 $\pm 0,929$	2,014	1,649	2,379	0,00
	S3	0,454 $\pm 0,211$	0,180 $\pm 0,099$	0,274	0,207	0,340	0,00
	S4	0,326 $\pm 0,182$	0,110 $\pm 0,060$	0,216	0,161	0,270	0,00
	S5	0,123 $\pm 0,087$	0,048 $\pm 0,032$	0,075	0,051	0,104	0,00
	S6	0,086 $\pm 0,039$	0,037 $\pm 0,016$	0,049	0,036	0,060	0,00
	S HOA	0,599 $\pm 0,253$	0,227 $\pm 0,109$	0,372	0,294	0,452	0,00

Tabla 4. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en la muestra de jóvenes en baja y alta iluminación.

- Mayores:

Comparación de las aberraciones totales según el tipo de iluminación en la muestra de mayores. La tabla descriptiva para los mayores, se puede encontrar también en el anexo V.

ABERRACIONES TOTALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Mayores	$\phi$ pupilar	5,468 $\pm 1,045$	3,985 $\pm 0,729$	1,483	1,118	1,849	0,00
	S3	0,353 $\pm 0,183$	0,149 $\pm 0,061$	0,204	0,148	0,259	0,00
	S4	0,219 $\pm 0,148$	0,085 $\pm 0,037$	0,134	0,090	0,178	0,00
	S5	0,072 $\pm 0,036$	0,042 $\pm 0,020$	0,030	0,018	0,042	0,00
	S6	0,054 $\pm 0,023$	0,032 $\pm 0,012$	0,022	0,014	0,029	0,00
	S HOA	0,434 $\pm 0,223$	0,184 $\pm 0,068$	0,250	0,184	0,318	0,00

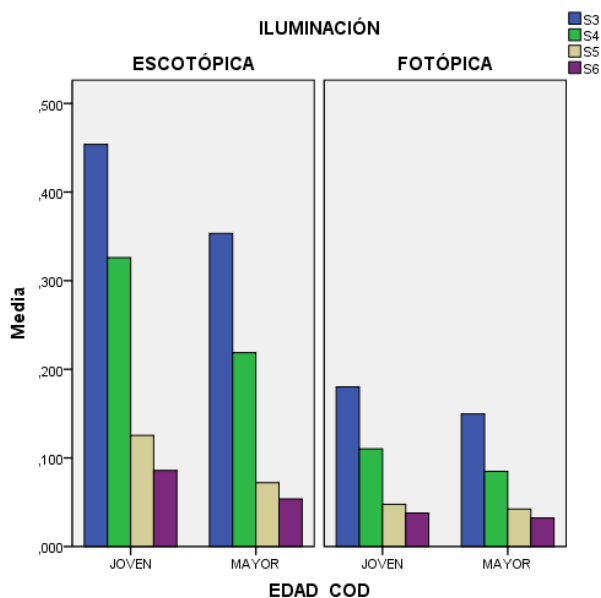
Tabla 5. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración total en la muestra de mayores en baja y alta iluminación.

Haciendo un análisis conjunto de *Tabla 4* y *Tabla 5* se puede ver que en ambos casos, tanto en jóvenes como en mayores, coincide el hecho de que para todos los órdenes de RMS las aberraciones son mayores en condiciones de baja iluminación, siendo valores estadísticamente significativos con una  $p = 0,000$  en todos los casos. Por lo que una vez más se confirma el hecho de la gran dependencia que presentan las aberraciones con el diámetro pupilar, pudiendo afirmar que a mayor diámetro pupilar, mayores serán las aberraciones oculares totales, independientemente de la edad de la muestra. Si nuevamente nos fijamos en las columnas en que están los valores de las diferencias de aberración entre ambas condiciones de iluminación, podemos ver que este aumento de las aberraciones para un diámetro pupilar mayor puede tener una gran importancia clínica.

#### - Comparación de las aberraciones totales entre Jóvenes y Mayores

El objetivo principal de este estudio es ver qué pasa con las aberraciones en función de la edad. En primer lugar, se puede observar la diferencia entre ambas muestras en la *Gráfica 3*. Cada barra representa un orden de aberración que siempre es mayor en iluminación escotópica que en fotópica tanto para jóvenes como mayores. En todos los casos se observa también cómo las aberraciones totales son mayores para jóvenes.

Comparando cuantitativamente los resultados de jóvenes con mayores en la *Gráfica 3* vemos que tanto en baja iluminación como en alta iluminación y para todos los órdenes, la aberración es mayor en jóvenes. A continuación se puede observar la *Tabla 6* comparativa de los resultados.



Gráfica 3. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración entre jóvenes y mayores, diferenciando si se trata de iluminación escotópica o fotópica.

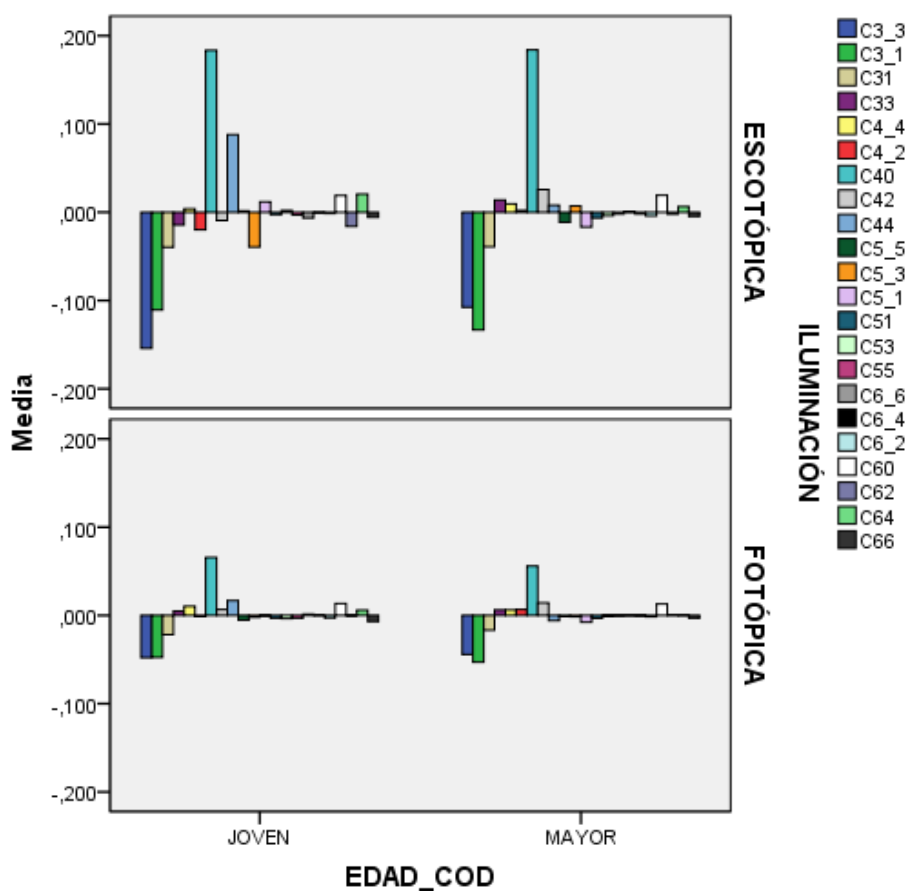
ABERRACIONES TOTALES ( $\mu\text{m}$ )		Jóvenes	Mayores	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Baja iluminación	$\phi$ pupilar	7,345 $\pm$ 0,870	5,468 $\pm$ 1,045	1,877	1,487	2,267	0,000
	S3	0,454 $\pm$ 0,211	0,353 $\pm$ 0,183	0,101	0,020	0,180	0,015
	S4	0,326 $\pm$ 0,182	0,219 $\pm$ 0,148	0,107	0,040	0,175	0,002
	S5	0,123 $\pm$ 0,087	0,072 $\pm$ 0,036	0,051	0,026	0,080	0,000
	S6	0,086 $\pm$ 0,039	0,054 $\pm$ 0,023	0,032	0,019	0,045	0,000
	S HOA	0,599 $\pm$ 0,253	0,434 $\pm$ 0,223	0,165	0,068	0,262	0,001
Alta iluminación	$\phi$ pupilar	5,331 $\pm$ 0,929	3,985 $\pm$ 0,729	1,346	1,007	1,675	0,000
	S3	0,180 $\pm$ 0,099	0,149 $\pm$ 0,061	0,031	-0,003	0,064	0,071
	S4	0,110 $\pm$ 0,060	0,085 $\pm$ 0,037	0,025	0,005	0,046	0,014
	S5	0,048 $\pm$ 0,032	0,042 $\pm$ 0,020	0,006	-0,005	0,016	0,323
	S6	0,037 $\pm$ 0,016	0,032 $\pm$ 0,012	0,005	-0,000	0,011	0,066
	S HOA	0,227 $\pm$ 0,109	0,184 $\pm$ 0,068	0,043	0,006	0,079	0,023

Tabla 6. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales, tanto para las condiciones de baja iluminación como para las condiciones de alta iluminación.

Con la anterior tabla se demuestra la intuición visual que se podía extraer de la *Gráfica 3*. Sobre los resultados obtenidos para baja iluminación, podemos decir que, en todos los órdenes de aberración, la aberración total es mayor en la muestra de jóvenes.

En el caso de los resultados obtenidos para alta iluminación, no todos muestran ser estadísticamente significativos: tres de los valores presentan un valor de  $p > 0,05$ . Esto puede ser debido a que el valor de la diferencia media de RMS para un determinado orden de aberración es un valor muy pequeño, por lo que no es significativo que en todos los individuos jóvenes un tipo de aberración en concreto (S3, S5 y S6) sea mayor que para los mayores. No obstante, las aberraciones totales de alto orden siguen siendo mayores para los jóvenes con un resultado estadística y clínicamente significativo, debido a la gran del tamaño pupilar.

En la *Gráfica 4* se muestra el resumen de todos los resultados obtenidos en las condiciones descritas en este apartado, pero para los polinomios de Zernike cada barra representa un coeficiente de los polinomios de Zernike en concreto y además se puede ver el signo y correspondiente para cada uno de ellos. Hablando de los coeficientes de los polinomios de Zernike, uno por uno, no se cumple el hecho de ser mayor en los jóvenes que en los mayores para todos los casos; pero al hablar del valor de RMS por órdenes de aberración, como se ha visto anteriormente, sí se cumple.



Gráfica 4. Aberraciones totales representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación tanto entre edades (jóvenes y mayores), como entre iluminaciones (escotópica y fotópica).

#### 5.4.2. Aberraciones totales con diámetro pupilar igual a 4 mm

Después de analizar los resultados obtenidos en el apartado anterior, para las diferentes muestras de población, se puede ver que las aberraciones tienen una dependencia muy grande del diámetro pupilar siendo de valores más elevados cuanto mayor sea éste. Por ello, si no se controla la variable del diámetro pupilar, en los resultados se puede interpretar que las aberraciones son mayores para la población joven que para la población mayor. La finalidad de este apartado es recoger los datos de toda la muestra y de los dos grupos de estudio por separado, de los valores de RMS obtenidos para cada orden de las aberraciones totales, utilizando los valores de las aberraciones oculares calculados para una pupila de 4 mm, para así controlar la medida del tamaño pupilar y lograr que éste sea un valor fijo para todos los sujetos. Esto nos ha de permitir comparar las posibles variaciones de las aberraciones con la edad.

Se han utilizado los datos calculados por el instrumento de medida utilizado para determinar las aberraciones con pupila de 4mm. Tan solo se tienen dos casos en los que en condiciones escóticas un ojo presenta una pupila inferior a 4 mm; no obstante en estos casos el aberrómetro también realiza un cálculo aproximado de las aberraciones que presentaría en 4 mm, por lo que todos los ojos se encuentran incluidos en este apartado.

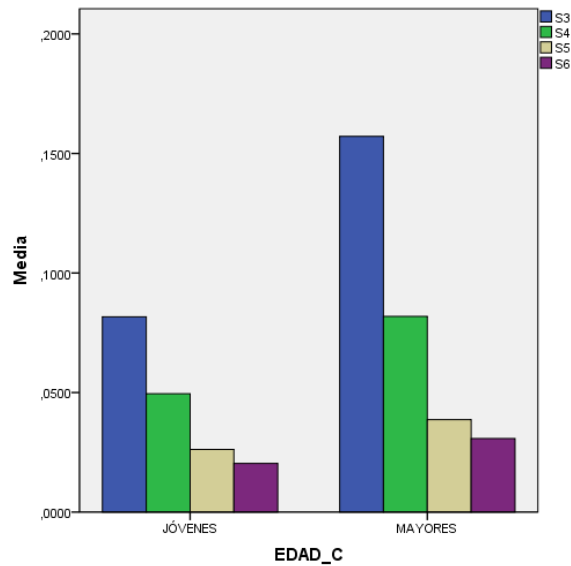
Se puede encontrar una tabla descriptiva para el caso de toda la muestra y para jóvenes y mayores en el anexo V; a pesar de ello los valores de la media y de la desviación estándar también se encuentran en la siguiente tabla para poder hacer la comparación entre edades.

ABERRACIONES TOTALES ( $\mu\text{m}$ )	Jóvenes	Mayores	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
S3	0,082 $\pm$ 0,033	0,157 $\pm$ 0,107	-0,075	-0,108	-0,043	0,000
S4	0,049 $\pm$ 0,025	0,081 $\pm$ 0,089	-0,032	-0,059	-0,006	0,017
S5	0,026 $\pm$ 0,011	0,039 $\pm$ 0,040	-0,013	-0,024	-0,001	0,037
S6	0,020 $\pm$ 0,009	0,031 $\pm$ 0,025	-0,011	-0,018	-0,003	0,008
S HOA	0,104 $\pm$ 0,039	0,189 $\pm$ 0,143	-0,085	-0,127	-0,042	0,000

Tabla 7. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales en una pupila de 4mm.

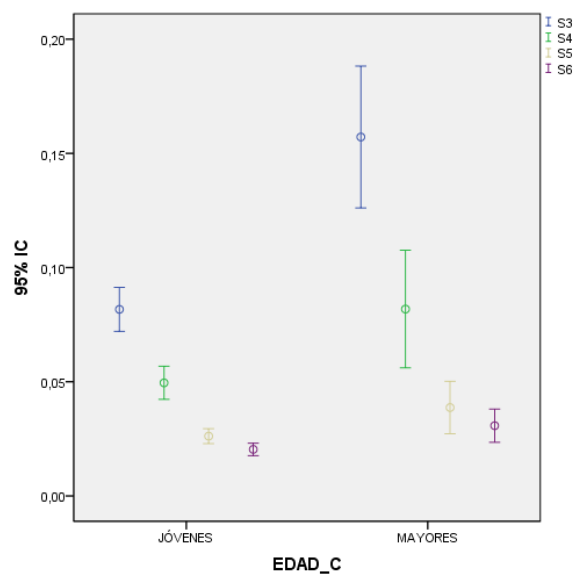
Comparando los resultados obtenidos de RMS para cada orden de aberración entre la muestra de jóvenes y de mayores, se puede ver cómo en este caso las aberraciones son superiores en la muestra de mayores de 50 años, para todos los órdenes de aberraciones, y con un valor de p

$<0,05$ , por lo que los resultados son significativos tanto clínica como estadísticamente. Esto mismo se puede observar en la *Gráfica 5*.



Gráfica 5. Gráfico de barras representando los diferentes órdenes de RMS en las aberraciones totales comparando jóvenes con mayores.

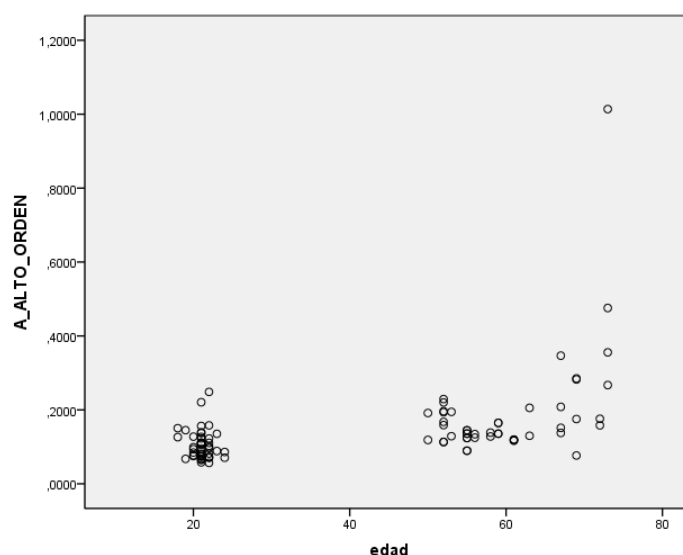
En la siguiente *Gráfica 6* se puede ver, al comparar los valores de RMS para cada orden de aberración total entre jóvenes y mayores, que el valor medio del resultado de RMS para la muestra de mayores se encuentra suficientemente alejado como para que este valor sea relevante.



Gráfica 6. Representación gráfica de los órdenes RMS mediante barras de error teniendo en cuenta el intervalo de confianza (IC), tanto para jóvenes como para mayores.

Además, observando los resultados de la *Tabla 6* de descriptivos para la muestra total, (que se puede encontrar en el anexo V), se puede ver cómo el valor mínimo de cada RMS corresponde a la muestra de jóvenes, De manera similar ocurre para el valor máximo de los RMS, que siempre corresponde a la muestra de mayores para el caso de todos los órdenes de RMS. Esto nos indica que, hablando de toda la muestra como conjunto, el caso de la mínima aberración sea cual sea el orden del que se trate siempre pertenece a un individuo joven y lo mismo ocurre en el caso contrario, el máximo valor de aberración que se obtiene al analizar a toda la muestra, siempre pertenece a un individuo mayor de 50 años.

Con los presentes resultados obtenidos mediante la fijación del diámetro pupilar a 4 mm, ahora sí se puede afirmar que las aberraciones tienden a ser mayores con el paso de los años. En la *Gráfica 7*, se puede ver cómo existe un aumento en relación a la edad que empieza a notarse más a partir de los 60 años.



Gráfica 7. Dispersión de puntos para las dos muestras según la edad que presenta cada individuo, en el caso del RMS para el global de las aberraciones totales de alto orden.

## 5.5. ABERRACIONES CORNEALES

Una vez se han mostrado todos los resultados pertenecientes a las aberraciones totales del ojo y, hecha la respectiva comparación entre iluminaciones y entre edades, se va a realizar el mismo proceso para el caso de las aberraciones corneales.

### 5.5.1 Aberraciones corneales en función del diámetro pupilar

Los resultados que se presentan a continuación pertenecen a valores de RMS pertenecientes al mismo orden de aberración corneal, con el tamaño de la pupila natural para cada individuo y teniendo en cuenta el nivel de iluminación, por lo que se realizará un análisis comparativo

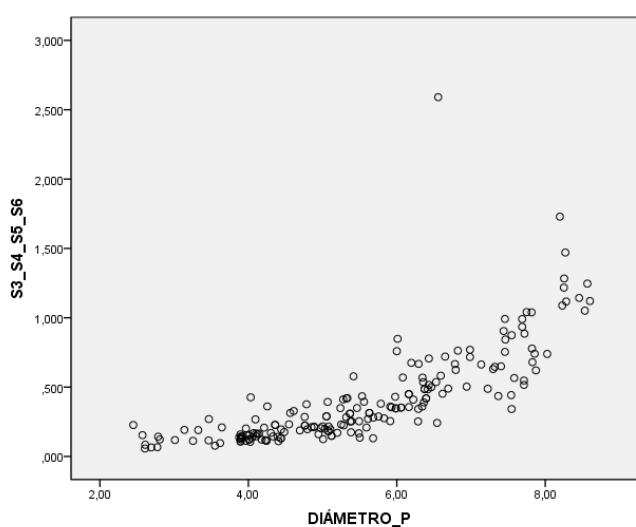


entre los RMS de las aberraciones corneales según la iluminación presente y según el rango de edad al que pertenece la muestra.

#### - Toda la muestra

Se puede ver la tabla descriptiva de las aberraciones corneales para toda la muestra en el anexo VI, que incluye el valor de la media aritmética, desviación estándar, valor mínimo y máximo. Pero algunos de estos datos también pueden verse en la *Tabla 8*.

Se van a comparar las aberraciones según el diámetro pupilar. Para ello se han utilizado dos condiciones de iluminación diferentes para cada individuo. En la siguiente *Gráfica 8* se puede ver la representación de las aberraciones corneales de alto orden en función del diámetro pupilar, observándose un crecimiento de éstas conforme aumentamos el diámetro. Este crecimiento al igual que pasaba en las aberraciones totales, es mayor a partir del tamaño de la pupila de 5 mm dándose una línea de regresión no lineal, ajustándose más a una de tipo exponencial.



Gráfica 8. Gráfico de dispersión de puntos. Muestra el aumento del RMS de las aberraciones corneales de alto orden en función del diámetro pupilar.

El valor de RMS para las aberraciones corneales de cada orden es mayor en condiciones de baja iluminación debido a que el diámetro pupilar es mayor. Todos los resultados muestran un valor de p significativo por lo que vemos que las aberraciones corneales también tienen una dependencia del diámetro pupilar.

ABERRACIONES CORNEALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Toda la muestra	$\phi$ pupilar	6,406 $\pm 1,344$	4,658 $\pm 1,072$	1,748	1,402	20,95	0,000
	S3	0,403 $\pm 0,253$	0,166 $\pm 0,099$	0,237	0,182	0,291	0,000
	S4	0,387 $\pm 0,288$	0,116 $\pm 0,098$	0,271	0,210	0,332	0,000
	S5	0,106 $\pm 0,126$	0,053 $\pm 0,033$	0,053	0,026	0,079	0,000
	S6	0,084 $\pm 0,087$	0,045 $\pm 0,028$	0,039	0,021	0,057	0,000
	S HOA	0,595 $\pm 0,389$	0,224 $\pm 0,133$	0,371	0,287	0,453	0,000

Tabla 8. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en toda la muestra en baja y alta iluminación. S3: RMS para tercer orden. S4: RMS para cuarto orden. S5: RMS para quinto orden. S6: RMS para sexto orden. S HOA: RMS para aberraciones de alto orden.

Si nos fijamos en la columna en la que se da el valor de la diferencia de medidas de los RMS en las dos condiciones de iluminación, se puede ver que en la mayoría de casos la aberración se duplica en condiciones de baja iluminación.

Después de ver los resultados obtenidos con la variación de iluminación para toda la muestra, separamos la población en dos grupos diferentes según el rango de edad, jóvenes y mayores analizando también la influencia de las aberraciones totales con el tamaño pupilar.

#### - Jóvenes

Comparación de las aberraciones corneales según el tipo de iluminación en la muestra de jóvenes, la correspondiente tabla descriptiva se puede observar en el anexo VI.

ABERRACIONES CORNEALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Jóvenes	$\phi$ pupilar	7,345 $\pm 0,870$	5,331 $\pm 0,929$	2,014	1,649	2,379	0,00
	S3	0,462 $\pm 0,212$	0,186 $\pm 0,115$	0,276	0,206	0,344	0,00
	S4	0,547 $\pm 0,267$	0,162 $\pm 0,117$	0,385	0,301	0,468	0,00
	S5	0,141 $\pm 0,116$	0,062 $\pm 0,040$	0,079	0,044	0,115	0,00
	S6	0,115 $\pm 0,080$	0,057 $\pm 0,032$	0,058	0,033	0,083	0,00
	S HOA	0,759 $\pm 0,337$	0,272 $\pm 0,158$	0,487	0,380	0,593	0,00

Tabla 9. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en la muestra de jóvenes en baja y alta iluminación.

Para el grupo de jóvenes, se puede ver cómo el RMS de las aberraciones corneales es, en todos los casos, mayor para baja iluminación. Una vez más podemos ver la dependencia de las aberraciones con el diámetro pupilar.

#### - Mayores

Comparación de las aberraciones corneales según el tipo de iluminación en la muestra de mayores, se puede observar la correspondiente tabla descriptiva para las aberraciones corneales en mayores en el anexo VI.

ABERRACIONES CORNEALES ( $\mu\text{m}$ )		Baja iluminación	Alta iluminación	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Mayores	$\phi$ pupilar	5,468 $\pm 1,045$	3,985 $\pm 0,729$	1,483	1,118	1,849	0,000
	S3	0,344 $\pm 0,278$	0,146 $\pm 0,077$	0,198	0,116	0,281	0,000
	S4	0,227 $\pm 0,209$	0,071 $\pm 0,036$	0,156	0,096	0,218	0,000
	S5	0,070 $\pm 0,128$	0,044 $\pm 0,225$	0,026	-0,011	0,063	0,172
	S6	0,053 $\pm 0,083$	0,033 $\pm 0,016$	0,020	-0,004	0,045	0,100
	S HOA	0,431 $\pm 0,370$	0,177 $\pm 0,080$	0,254	0,145	0,362	0,000

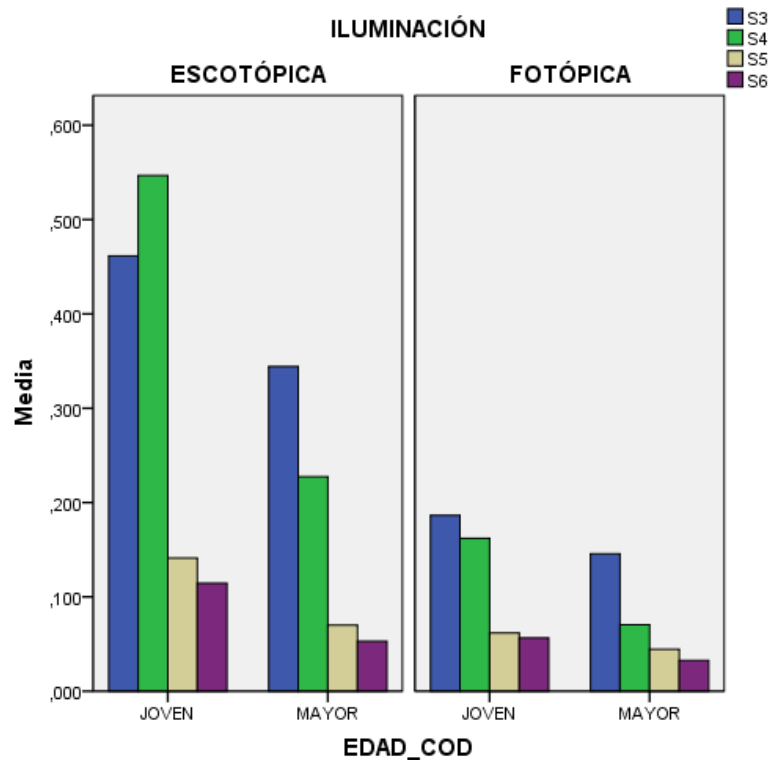
Tabla 10. Tabla en la que se comparan los valores de RMS para cada orden de aberración corneal en la muestra de mayores en baja y alta iluminación.

En el caso del grupo de los mayores, al comparar el orden RMS para las aberraciones corneales entre baja y alta iluminación, vemos cómo en todos los casos, al igual que en resultados vistos anteriormente, el valor RMS para las aberraciones corneales en baja iluminación es mayor que en alta iluminación.

Igualmente se observa que para el caso de S5 y S6 no existe mucha diferencia, y que el valor de p para estos dos órdenes no se muestra significativo.

#### - Comparación de las aberraciones corneales entre Jóvenes y Mayores

El gráfico de barras (*Gráfica 9*) representa el RMS para las aberraciones corneales de alto orden. Teniendo en cuenta la diferencia existente entre edades y entre iluminaciones, las aberraciones corneales se puede ver que son mayores para el grupo de jóvenes.



Gráfica 9. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración entre jóvenes y mayores diferenciando si se trata de iluminación escotópica o fotópica.

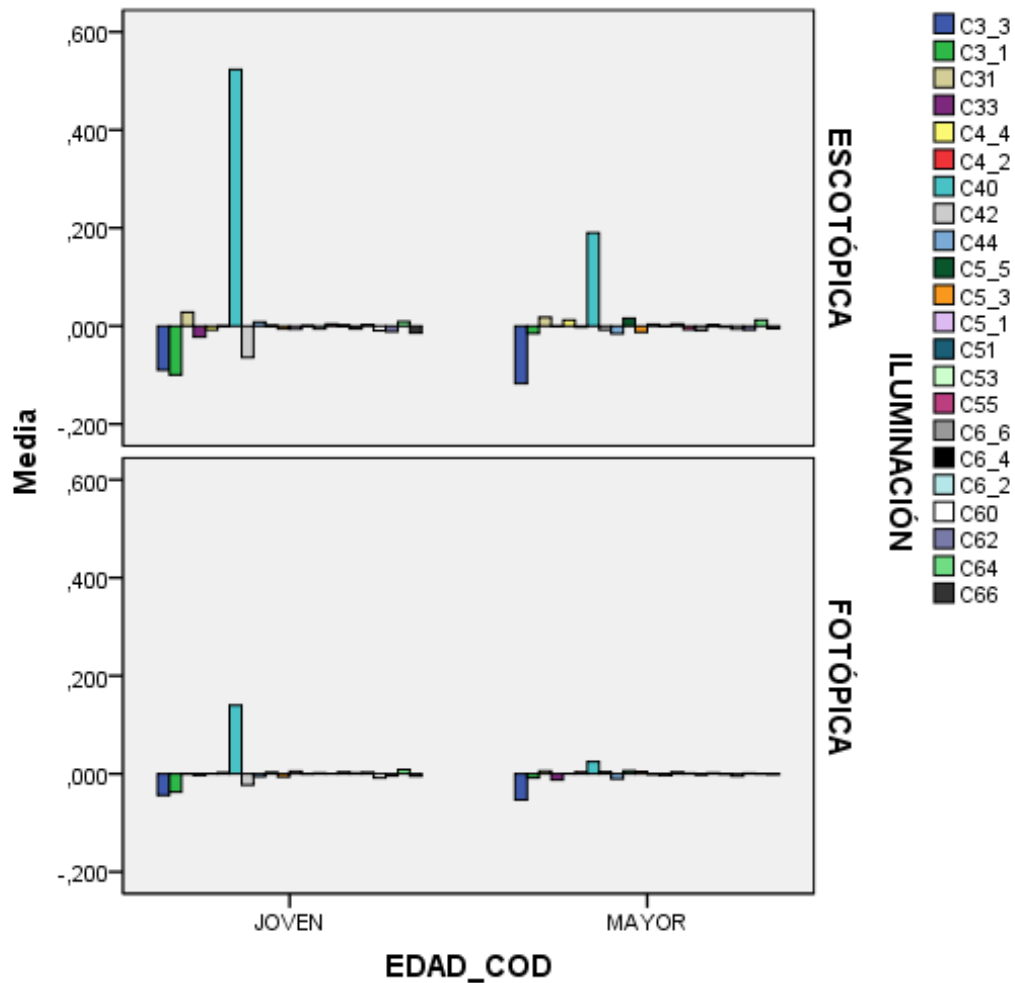
En la *Tabla 11*, en los resultados de las aberraciones en baja y alta iluminación se vuelve a manifestar que son mayores en el caso de los jóvenes, posiblemente debido también a la importante relación entre aberraciones y tamaño pupilar.

A diferencia de lo que se encontraba en los resultados de las aberraciones oculares totales para alta iluminación, en las aberraciones corneales todos los valores obtenidos son significativos, ya que existe mayor diferencia entre el valor medio de RMS para los diferentes órdenes de aberraciones entre los jóvenes y los mayores. Este resultado también lo consideramos de relevancia clínica.

ABERRACIONES CORNEALES ( $\mu\text{m}$ )		Jóvenes	Mayores	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
Baja iluminación	$\phi$ pupilar	7,345 $\pm 0,870$	5,468 $\pm 1,045$	1,877	1,487	2,267	0,000
	S3	0,462 $\pm 0,212$	0,344 $\pm 0,278$	0,118	0,017	0,217	0,022
	S4	0,547 $\pm 0,267$	0,227 $\pm 0,209$	0,320	0,222	0,416	0,000
	S5	0,141 $\pm 0,116$	0,070 $\pm 0,128$	0,071	0,022	0,120	0,005
	S6	0,115 $\pm 0,080$	0,053 $\pm 0,083$	0,062	0,028	0,095	0,000
	S HOA	0,759 $\pm 0,337$	0,431 $\pm 0,370$	0,328	0,184	0,471	0,000
Alta iluminación	$\phi$ pupilar	5,331 $\pm 0,929$	3,985 $\pm 0,729$	1,346	1,007	1,675	0,000
	S3	0,186 $\pm 0,115$	0,146 $\pm 0,077$	0,040	0,001	0,080	0,044
	S4	0,162 $\pm 0,117$	0,071 $\pm 0,036$	0,091	0,056	0,127	0,000
	S5	0,062 $\pm 0,040$	0,044 $\pm 0,225$	0,016	0,004	0,030	0,010
	S6	0,057 $\pm 0,032$	0,033 $\pm 0,016$	0,024	0,014	0,034	0,000
	S HOA	0,272 $\pm 0,158$	0,177 $\pm 0,080$	0,095	0,044	0,146	0,000

Tabla 11. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones corneales, tanto para las condiciones de baja iluminación como para las condiciones de alta iluminación.

Finalmente, se muestra en la *Gráfica 10* un resumen comparativo de todos los resultados analizados, mediante una representación gráfica en barras, cada una de ellas muestra un coeficiente de los polinomios de Zernike, desde el orden tres hasta el orden seis.



Gráfica 10. Aberraciones corneales representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación tanto entre edades (jóvenes y mayores), como entre iluminaciones (escotópica y fotópica).

### 5.5.2. Aberraciones corneales con diámetro pupilar igual a 4 mm

Hemos visto también que las aberraciones corneales son mayores para la muestra joven debido, posiblemente, a la dependencia de éstas con el diámetro pupilar. Por lo que a continuación se calculan las aberraciones para un diámetro pupilar de 4 mm para toda la muestra y se hace luego el análisis comparativo entre edades.

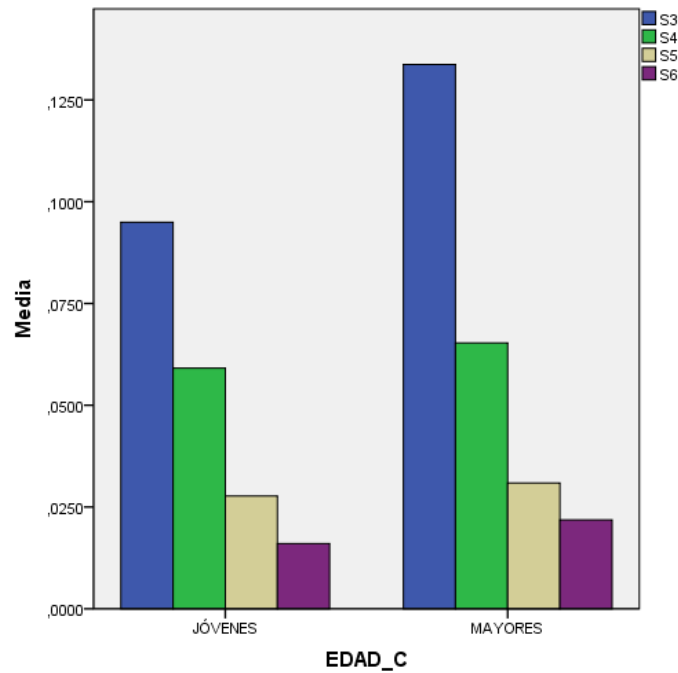
## - Comparación de las aberraciones corneales Jóvenes vs Mayores

ABERRACIONES CORNEALES ( $\mu\text{m}$ )	Jóvenes	Mayores	Diferencia de medias	Intervalo de confianza		Significación estadística (p)
S3	0,095 $\pm$ 0,048	0,134 $\pm$ 0,053	-0,039	-0,059	-0,018	0,000
S4	0,059 $\pm$ 0,033	0,065 $\pm$ 0,029	-0,006	-0,019	0,006	0,332
S5	0,028 $\pm$ 0,020	0,031 $\pm$ 0,023	-0,003	-0,012	0,005	0,468
S6	0,016 $\pm$ 0,012	0,022 $\pm$ 0,015	-0,006	-0,011	-0,000	0,044
S HOA	0,119 $\pm$ 0,059	0,158 $\pm$ 0,062	-0,039	-0,063	-0,014	0,002

Tabla 12. Resultados comparativos entre ambos grupos de edad para los diferentes resultados de RMS según el orden de aberraciones totales en una pupila de 4mm.

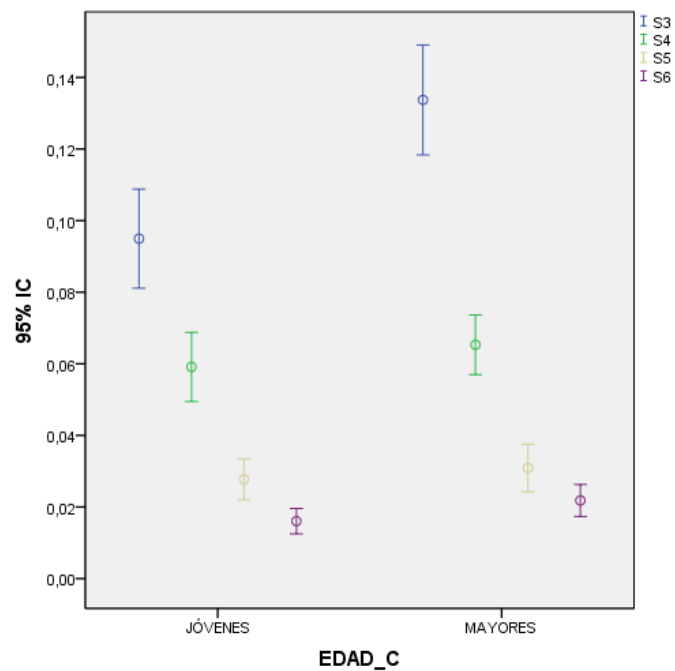
La *Tabla 12* es una tabla comparativa de las aberraciones corneales tanto de los jóvenes como de los mayores. Se puede ver que el valor de la RMS de cada orden para los mayores es en todos los casos mayor que la de los jóvenes. El resultado total del RMS de las aberraciones corneales de alto orden es estadísticamente significativo siendo mayor para el grupo de los mayores, pero encontramos los RMS de orden 4 y 5 con un valor de  $p > 0,05$  que nos indica que estos resultados no son significativos. Esto es debido a la pequeña diferencia que existe entre los valores medios de RMS para estos órdenes concretos de aberraciones corneales lo cual parece indicar que para algunos órdenes de alto orden de las aberraciones corneales no existe una gran diferencia entre jóvenes y mayores.

La diferencia en el valor de las aberraciones entre jóvenes y mayores, se puede apreciar en la *Gráfica 11*, donde se puede ver como para todos los valores de RMS para cada orden, las aberraciones corneales son mayores en mayores que en jóvenes, aunque la diferencia no sea demasiado significativa.



Gráfica 11. Gráfico de barras representando los diferentes órdenes de RMS en las aberraciones corneales comparando jóvenes con mayores.

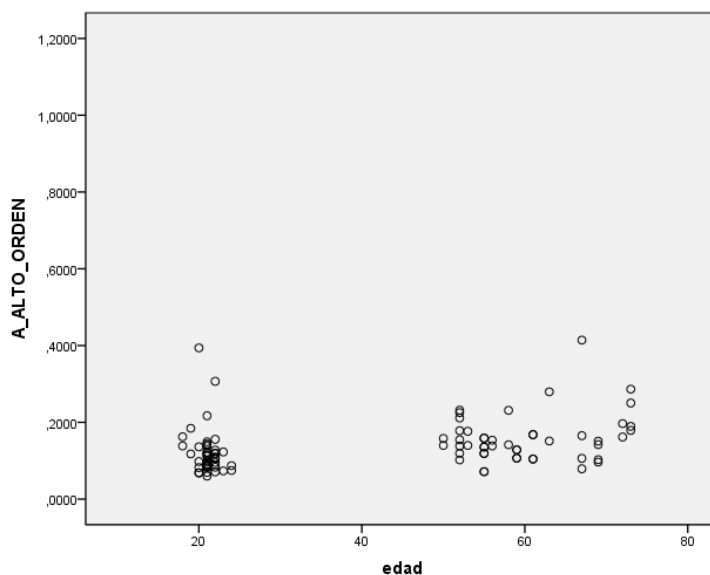
Como se puede ver en la gráfica, la representación del S4 y S5 para jóvenes y mayores, se encuentra prácticamente alineada. Este hecho se podrá ver mejor en la representación mediante barras de error (Gráfica 12), ya que ambas representaciones de S4 y S5 en el caso de los mayores se encontrará el valor medio dentro del rango del intervalo de confianza de los jóvenes.



Gráfica 12. Representación gráfica de los órdenes RMS mediante barras de error teniendo en cuenta el intervalo de confianza (IC), tanto para jóvenes como para mayores.



Observamos ahora la siguiente *Gráfica 13* de dispersión de puntos para la muestra de jóvenes y mayores, representada según la edad del individuo y para el resultado de RMS para el global de aberraciones corneales de alto orden, no se aprecia tanta diferencia entre jóvenes y mayores.



Gráfica 13. Dispersión de puntos para las dos muestras según la edad que presenta cada individuo, en el caso del RMS para el global de las aberraciones corneales de alto orden.

## 5.6. COMPARACIÓN DE LAS ABERRACIONES TOTALES, CORNEALES.

Después de analizar las aberraciones totales y corneales por separado, en este apartado se analizarán conjuntamente para así ver si la edad induce a algún cambio en la relación entre ellas. Se tratarán los resultados, en primer lugar, en función del diámetro pupilar y después, para diámetro pupilar de 4 mm. Además se tratará el concepto de aberraciones internas, representadas también gráficamente ya que el mismo instrumento ha hecho una simulación de los resultados para aberraciones internas.

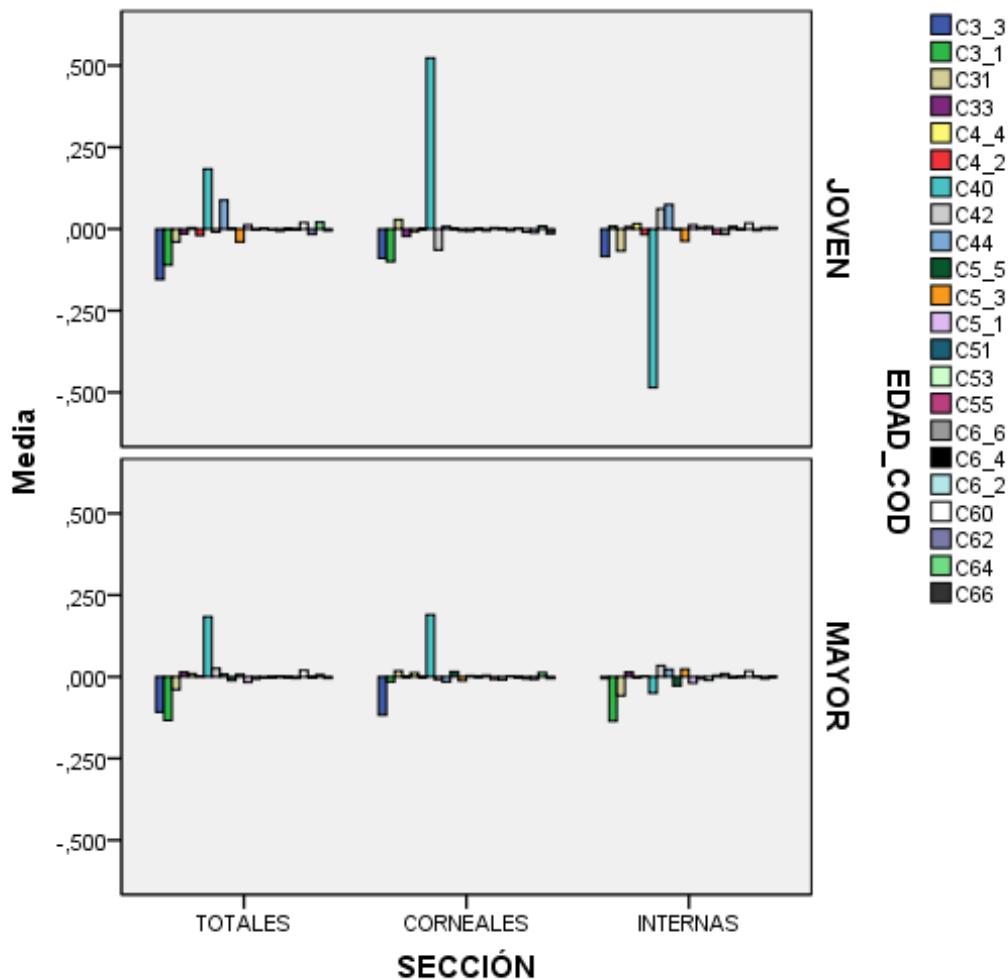
### 5.6.1 Relación entre aberraciones totales y corneales en función del diámetro pupilar

Como se ha visto en apartados anteriores, tanto en el 5.3 como en el 5.4, cuando mantenemos el diámetro real que presenta la persona, los resultados muestran que los jóvenes presentan mayores aberraciones que los mayores, posiblemente debido a la dependencia de las aberraciones con el diámetro pupilar.

En la *Gráfica 14* se representan los coeficientes de Zernike para las aberraciones de orden 3 a 6 en cada una de las secciones, aberraciones oculares, corneales e internas, que muestran los individuos jóvenes y mayores en baja iluminación.

Si nos fijamos en el rectángulo superior correspondiente a los jóvenes y concretamente con la aberración C40, por ser más fácil de intuir debido a la dimensión que presenta, se puede ver cómo el valor es más grande para las aberraciones corneales, seguido de las internas y finalmente las totales. Esto indica que existe una compensación entre la córnea y el cristalino que hace que la aberración resultante sea de menos valor que cada una de las otras dos por separado. Al tratarse de coeficientes de polinomios de Zernike y no de RMS, se puede ver cómo la compensación es debida a que el valor para el coeficiente C40 en la córnea y en el cristalino tienen signo contrario.

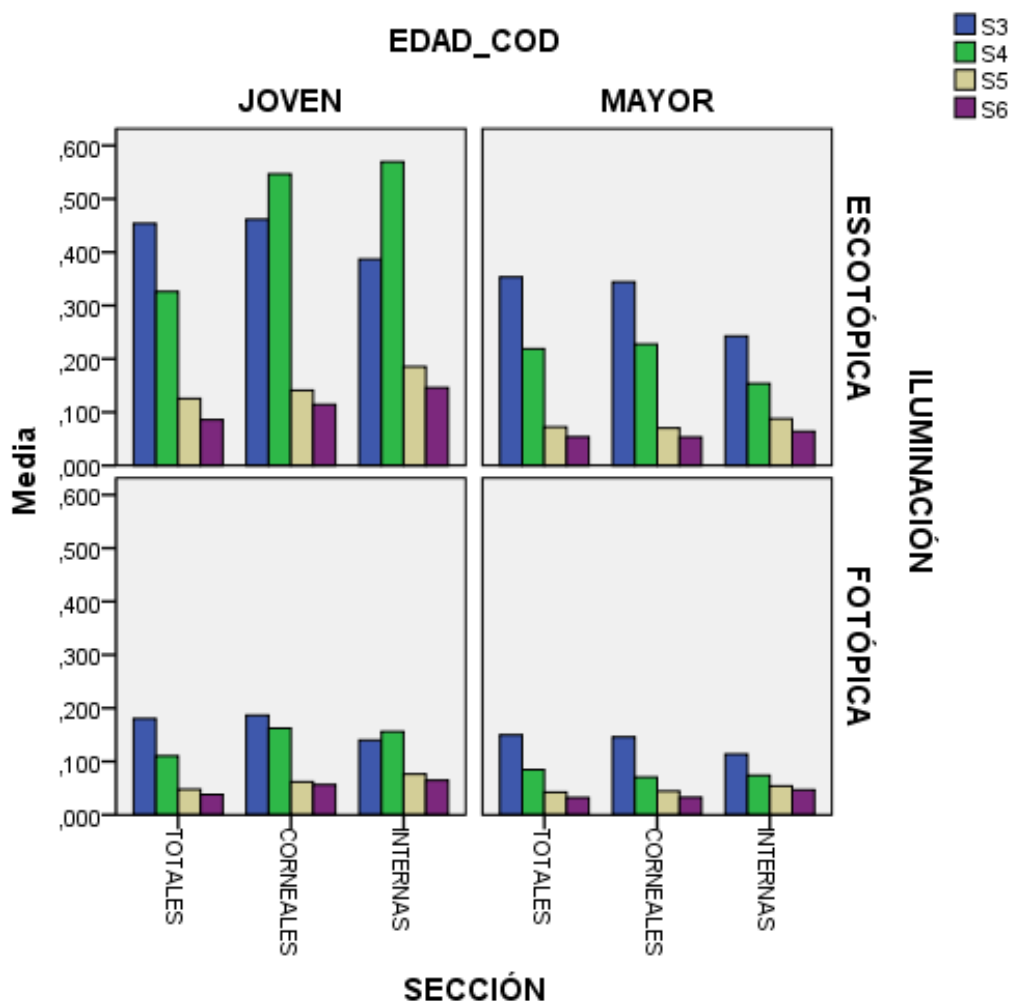
Ahora, si nos fijamos en el rectángulo inferior correspondiente a los mayores, y también en la aberración C40, se puede ver cómo a diferencia del caso de los jóvenes, prácticamente las aberraciones totales y corneales son del mismo valor. El valor de la aberración interna para C40, también es de signo contrario al corneal, pero de mucha menor magnitud por lo que la compensación es prácticamente inexistente.



Gráfica 14. Aberraciones representadas mediante los diversos coeficientes de los polinomios de Zernike, realizando una comparación entre edades (jóvenes y mayores) para cada sección correspondiente (totales, corneales e internas).

Con esto podemos observar que las aberraciones corneales e internas se encuentran relacionadas con las totales, produciéndose en la mayoría de los casos una cierta compensación entre ellas, más significativa en jóvenes que en mayores.

Hablando ahora de los resultados según el RMS para cada orden de aberración. Como se puede ver en la *Gráfica 15*, primero se representará la diferencia entre secciones, comparando jóvenes y mayores mediante columnas e iluminación, mediante filas.



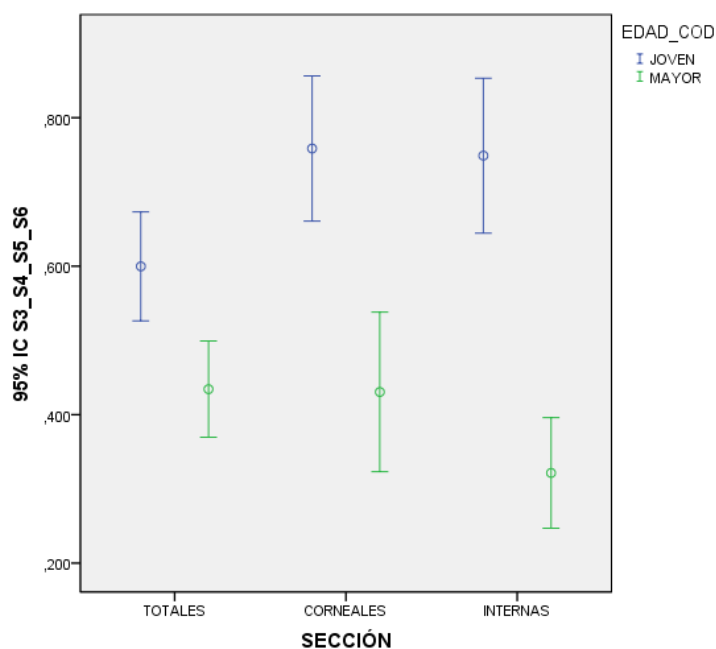
Gráfica 15. Gráfica de barras comparando los RMS de cada orden de aberración según la sección de la que se trate (totales, corneales e internas) tanto entre baja y alta iluminación, como entre jóvenes y mayores.

Observando la *Gráfica 15*, en jóvenes para todos los RMS de cada orden de aberración, el resultado de las aberraciones totales es menor que el resultado de las corneales y de las internas, tanto en iluminación escotópica como fotópica, esto nos parece indicar que existe una compensación por parte de las aberraciones corneales e internas que dan como resultado unas aberraciones totales, menores que cada una de las otras dos por separado.

Esto no ocurre en la muestra de individuos de más edad, tanto en iluminación escotópica como fotópica, ya que en los órdenes tres y cuatro (S3 y S4), son mayores las aberraciones totales y existe una disminución en las internas, por lo que la compensación que se producía en jóvenes entre corneales e internas aquí se muestra disminuida.

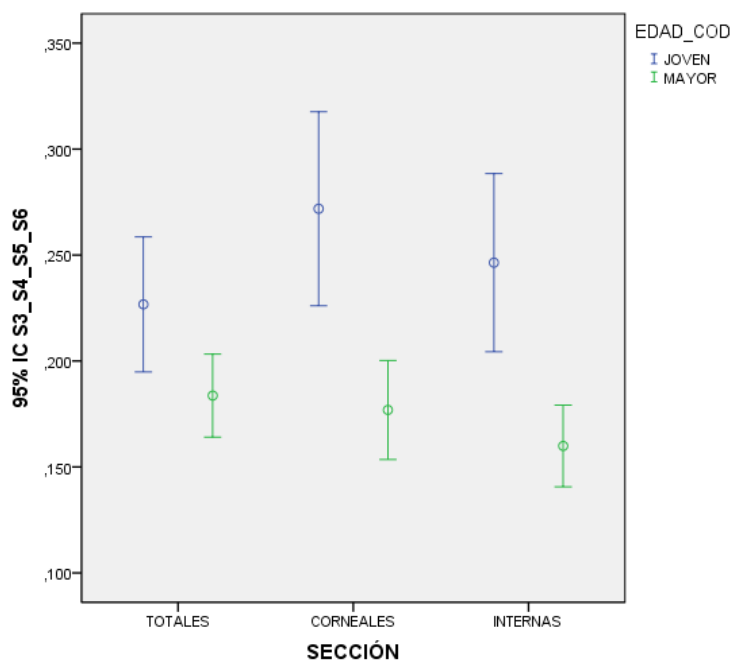
Ahora que ya hemos visto cómo actúan los diferentes órdenes de aberración, en la siguiente gráfica, se verá solamente representado el resultado global de todas las aberraciones oculares totales de alto orden (HOA) especificando si se trata de jóvenes o de mayores, y entre baja y alta iluminación.

En la *Gráfica 16*, (baja iluminación), fijándonos en las barras de error de los jóvenes se observa cómo las aberraciones corneales e internas son mayores que las totales, por lo que la compensación existente entre córnea y medios internos da como resultado unas aberraciones totales menores. En cambio, en los mayores las aberraciones internas son menores, haciendo que las totales sean de mayor valor, puesto que no se logra compensar tanto las aberraciones totales.



Gráfica 16. Barras de errores representando el global de aberraciones de alto orden totales, corneales e internas tanto para jóvenes como para mayores, en condiciones de baja iluminación.

De forma similar ocurre en el caso de alta iluminación, aunque las aberraciones son menores. Estos resultados se pueden observar en la *Gráfica 17*.



Gráfica 17. Barras de errores representando el global de aberraciones de alto orden totales, corneales e internas tanto para jóvenes como para mayores, en condiciones de alta iluminación.

### 5.6.2 Aberraciones con diámetro pupilar igual a 4 mm

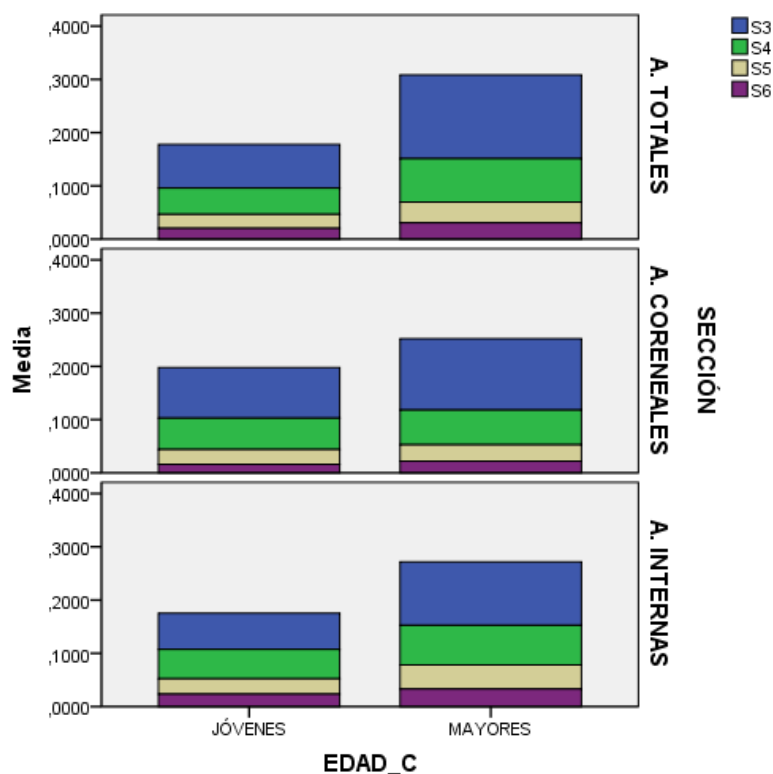
Siguiendo con la estructura del capítulo de resultados, y para finalizar, vamos a comparar las aberraciones oculares totales y corneales para un tamaño de pupila concreto con el fin de controlar esta variable tan importante.

En la siguiente *Gráfica 18* están representadas las aberraciones de alto orden de las diferentes secciones, oculares, corneales e internas, comparadas entre jóvenes y mayores.

En el caso de los jóvenes, se puede ver que las aberraciones corneales son mayores, que las totales, esto demuestra que hay una compensación entre corneales e internas que hace que el valor total de las aberraciones disminuya.

En el caso de los mayores, se puede ver que las aberraciones de más valor son las totales, por lo que parte de la compensación que existía en los jóvenes entre córnea y cristalino ya no existe.

Además de ello, en la misma gráfica podemos ver, comparando ambos rangos de edad, cómo la variación de las aberraciones totales entre ambos grupos de edad es mayor que la variación de las aberraciones corneales entre ellos. Esto mismo se apreciará con más detalle a continuación en *Tabla 13*.



Gráfica 18. Gráfica agrupada, representando el RMS para cada orden de aberración, pudiendo comparar entre jóvenes y mayores, y mediante filas entre totales corneales e internas para una pupila de 4mm.

En la siguiente tabla se puede ver cuantitativamente la diferencia entre las aberraciones totales de jóvenes y mayores y la diferencia entre las aberraciones corneales de jóvenes y mayores, viendo así los cambios producidos en ambos casos para la condición de diámetro pupilar fijo a 4 mm.

	Aberraciones totales			Aberraciones corneales		
	Jóvenes	Mayores	Diferencia	Jóvenes	Mayores	Diferencia
S3	0,082	0,157	-0,075	0,095	0,134	-0,039
S4	0,049	0,081	-0,032	0,059	0,065	-0,006
S5	0,026	0,039	-0,013	0,028	0,031	-0,003
S6	0,020	0,031	-0,011	0,016	0,022	-0,006
S HOA	0,104	0,189	-0,085	0,119	0,158	-0,039

Tabla 13. Comparación entre la diferencia existente de las aberraciones totales entre jóvenes y mayores, y la diferencia de las aberraciones corneales entre jóvenes y mayores.

En todos los casos tanto las aberraciones totales como las corneales son valores más grandes para el caso de los mayores, por lo que la diferencia, entre jóvenes y mayores, siempre va a dar negativa. Al comparar los dos recuadros de color amarillo, se observa cómo los valores de la diferencia de las aberraciones totales son mayores que la diferencia de las aberraciones corneales, por lo que indica que, con la edad, se produce mayor cambio en las aberraciones totales que en las corneales.

## **6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

### **6.1. DISCUSIÓN**

El principal objetivo de este trabajo es ver cómo varían las aberraciones oculares de alto orden en función de la edad. Para ello se ha realizado un estudio con dos rangos de edades diferentes, y se han medido las aberraciones totales y corneales de cada uno de ellos.

Puesto que de cada individuo tenemos medidas en alta iluminación y en baja iluminación, también se pueden comparar las aberraciones oculares en función del tamaño del diámetro pupilar.

En este apartado se van a comparar los resultados de este estudio con resultados de otros autores que han trabajado en condiciones y con objetivos semejantes a los presentes para poder ver si hay coincidencia.

#### **Aberraciones según el diámetro pupilar**

Se ha encontrado diferencias estadísticamente significativas entre las medidas de aberraciones oculares de alto orden tanto en alta como en baja iluminación, obteniéndose mayores valores en condiciones de baja iluminación, lo cual tan solo se justifica por el aumento del diámetro pupilar. Es decir, tanto en jóvenes como en mayores al aumentar el diámetro pupilar aumentan las aberraciones oculares. En un estudio hecho por Montés (2004) en el que habla del efecto positivo y negativo de las aberraciones ópticas, observó que, utilizando dos diámetros pupilares diferentes para un mismo individuo las aberraciones son mayores, cuanto mayor es el diámetro, pero observó que cada aberración afecta de manera diferente a la calidad de la imagen retiniana. Resultados similares también se refieren en el estudio de Thomas O.Salmon et al (2006) en un estudio en que se puede ver la variación del valor de los coeficientes de Zernike de las distintas aberraciones de alto orden para distintos diámetros pupilares y se confirma una reducción en todos ellos hasta sexto orden.

#### **Aberraciones según la edad**

En los resultados obtenidos en el apartado 4 se ha visto cómo cuando no teníamos constante el valor del diámetro pupilar, las aberraciones oculares de alto orden se han demostrado de mayor magnitud en el grupo de los sujetos jóvenes, por lo que se han calculado las aberraciones para un diámetro de 4 mm para todos los individuos.

En estas condiciones de diámetro pupilar constante, los resultados muestran claramente cómo las aberraciones oculares de alto orden son mayores en el grupo de mayor edad. En esta muestra de personas mayores se aprecia que los valores de RMS para cada orden de aberraciones totales son significativamente de más valor que los valores de RMS del grupo de jóvenes.

Según un estudio realizado por Brunette (2003) sobre la variación de aberraciones en una muestra amplia de sujetos y de edades muy diferentes (desde 5 años hasta 82 años), las aberraciones oculares en la población de edad avanzada son mayores que las aberraciones en los adultos jóvenes, pero la población de niños muestra unas aberraciones mayores que los adultos jóvenes, por lo que los niños tienen peor calidad visual. Según Brunette, este hecho es debido al efecto de la emetropización que no solamente tiene en cuenta las aberraciones de bajo orden, sino que también influyen las de alto orden, en el proceso de desarrollo del ojo.

Por esta dependencia de las aberraciones oculares de alto orden con el diámetro pupilar, (tanto totales como corneales) en todos los estudios que pretenden sacar conclusiones sobre las aberraciones, se diseñan para tener la variable del tamaño pupilar controlada. Bien sea por que la dejan con valor constante o porque comparan los resultados a distintos valores para conocer su influencia.

Un dato a destacar es que, en condiciones de la vida diaria, todos tenemos y vemos con nuestro diámetro pupilar, por lo que según resultados obtenidos en este trabajo, gracias a la miosis senil producida en los mayores, las aberraciones oculares se reducen hasta el punto de ser significativamente menores que en el grupo de jóvenes.

Además, aun así, todos sabemos que la visión se deteriora con el paso de los años. Por lo tanto, en este deterioro, en condiciones naturales, deben intervenir otros factores que reducen la calidad visual bien sean ópticos o de transmisión neuronal. Por ejemplo en un trabajo de Kazutaka Kamiya et al (2012) se demuestra que la calidad de la imagen óptica registrada mediante la técnica de doble paso se deteriora a medida que la edad de los sujetos aumenta.

### **Aberraciones totales, corneales e internas**

Una vez analizadas tanto las aberraciones oculares de alto orden totales y corneales se ha estudiado qué ocurre con las aberraciones internas y si existe alguna variación en grupos de edades diferentes. Según los resultados de este estudio, se muestra que las aberraciones totales, corneales e internas de alto orden se encuentran relacionadas y que esta relación no es constante si no que sufre variaciones con el paso de los años. En pacientes jóvenes las aberraciones de alto orden corneales e internas realizan algún tipo de compensación que hacen que las aberraciones totales sean menores que cada una de las otras dos por separado. En el caso de los sujetos mayores de 50 años, no ocurre exactamente esto, si no que parece ser que la compensación entre la córnea y el cristalino disminuye.

En un estudio realizado por Artal (2002) sobre los cambios producidos en las aberraciones en función de la edad, enuncia que el valor de RMS para las aberraciones totales de alto orden aumenta más de tres veces entre jóvenes y mayores, en cambio, las aberraciones corneales sólo aumentan ligeramente con la edad. En nuestro estudio también se puede observar según los resultados explicados en la *Tabla 13* que las aberraciones totales aumentan en mayor medida que las corneales, para todos los órdenes de aberración. Debido a que las aberraciones



corneales, a diferencia de las totales, no varían excesivamente con la edad no nos queda más remedio que pensar que son las internas las que también aumentan con el paso de los años.

Artal (2002) en el mismo estudio, también afirma que en la mayoría de los pacientes más jóvenes, el total de aberraciones oculares son más bajas que las aberraciones corneales, mientras que en los sujetos de mayor edad se produce la condición inversa. Resultados análogos son los de nuestro estudio ya que también se puede ver cómo el valor medio de RMS de las aberraciones totales de alto orden en jóvenes, son más bajos que para las aberraciones corneales. En el caso de los mayores, se cumple que en todos los órdenes las aberraciones totales son mayores que las corneales.

Takashi (2004), en su estudio sobre cambios en las aberraciones oculares y corneales con la edad y con un rango de edad mayor, concluye que después de los 50 años las aberraciones oculares aumentan abruptamente debido al incremento de las aberraciones de alto orden del cristalino.

## 6.2. CONCLUSIONES

Después de realizar toda la búsqueda de información necesaria, de realizar la parte experimental del trabajo, de tratar los resultados obtenidos para poder dar una interpretación de ellos y relacionarlos con otros estudios similares, vamos a sintetizar las conclusiones principales a las que se ha llegado con la realización de este estudio.

- Tanto las aberraciones totales como las aberraciones corneales aumentan en condiciones de baja iluminación.
- En condiciones naturales del diámetro pupilar, la población de los jóvenes presenta mayores aberraciones tanto totales como corneales que los mayores de 50 años, debido a la disminución del diámetro pupilar que de forma fisiológica se presenta en estos últimos.
- Cuando se controla en diámetro pupilar a 4 mm, las aberraciones oculares de alto orden, tanto totales como corneales, aumentan al aumentar la edad presentando más aberraciones la muestra de mayores de 50 años que la muestra de jóvenes.
- El cambio producido en función de la edad en las aberraciones totales, es mayor que el cambio producido en las aberraciones corneales.
- En los jóvenes el cristalino compensa parte de las aberraciones corneales.
- En los mayores esta compensación se reduce, aumentando el valor de las aberraciones totales.

## 6.3. CONCLUSIONES PERSONALES

Como conclusiones personales al trabajo quiero decir que, tal y como ya desde un principio he comentado, tengo un gran interés en profundizar en las técnicas actuales utilizadas en el

ámbito clínico. De ahí el hecho de escoger las aberraciones por el gran volumen de estudios y la importancia clínica que están teniendo hoy en día.

A su vez, a lo largo del trabajo he podido ir refrescando conceptos utilizados en varias asignaturas de la carrera, no solo clínicas y prácticas, como anatomía, fisiología, OCC, etc, sino también otras más generales, como óptica geométrica, óptica física... relacionar conceptos entre ellas y ver que realmente en el día a día de mi futura profesión todas están relacionadas.

A lo largo de la carrera se había mencionado el tema de las aberraciones oculares, pero sin tiempo para profundizar mucho en ellas. Realizando este trabajo, me he podido dar cuenta de que es un campo realmente amplio, que he aprendido mucho pero que todavía queda muchísimos aspectos por tratar. Yo solamente he tenido en cuenta el ojo sano, trabajando con edad y diámetro pupilar, pero existen otros factores como la acomodación, excentricidad, que también estarían interesantes de ver, además del ojo patológico en pacientes de queratocono, cirugía de cataratas o cirugía refractiva que aunque haya varios estudios sobre ellos, son temas también realmente interesantes.

Comentar también que las conclusiones a las que se ha llegado al final del trabajo podrían también mejorarse o tener mayor relevancia con una muestra de más individuos y de mayor rango de edades, para observar mejor la progresión y en el caso de la edad realizar un seguimiento a lo largo de las edades.

La experiencia conjunta de todo el trabajo ha sido realmente buena ya que he podido ampliar conocimientos en un tema en concreto, tanto en la parte teórica como en la realización práctica e incluso en la interpretación estadística de resultados, que es algo que apenas se había tratado a lo largo de la carrera.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Aguirre Polo M. Cambios en los parámetros de calidad óptica ocular proporcionados por OQAS entre población sana joven y adulta. 2011 Enero. Universitat Politècnica de Catalunya.

Aldaba M. Medida de la respuesta acomodativa con un sistema de doble paso. Aplicación al estudio de la acomodación en función de la edad. 2012. Universitat Politècnica de Catalunya.

Artal P, Berrio E, Guirao A. Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. *Journal of the optical society of America*. 2002 Enero; 19(1).

Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR. Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye. *Journal of Vision*. 2001 Mayo; 10(1167).

Ávila Gómez FJ. Polarización y calidad de imagen retiniana en sujetos jóvenes. 2011 Junio. Universidad de Murcia.

Benito Galindo A. Montaje y calibrado de un aberrómetro clínico de tipo Hartmann-Shack. 2008 Julio. Universidad de Murcia.

Cánovas Picón F. Sensor Shack-Hartmann. 2011. Universidad de Murcia.

Castejón Mochón JF, López Gil N, Benito A, Artal P. Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population. *Vision Research*. 2002 Enero; 42.

Chan Lin I, Jong Wang I, Mei Shu L, Fung Rong H, Lin L. Refractive-Error Quality of Life (RQL) in Patients with AcrySof IQ Aspherical Intraocular Lenses. *Journal of Optometry*. 2010 Marzo; 3(1).

Cheng X, Bradley A, Thibos LN. Predicting subjective judgment of best focus with objective image quality metrics. *Journal of Vision*. 2004 Abril; 4.

Comastri SA, Pfortner T, Martin G. Calidad visual: fundamentos físicos de los métodos actuales para diagnóstico y tratamiento de errores refractivos. 2007 Febrero. Universidad de Belgrano.

Declaración de Helsinki de la asociación médica mundial. 2008 Noviembre. Madrid.

Del Castillo Ruiz A, Hernández Quintela E. Aberraciones corneales de alto orden. ¿Un método para graduar al queratocono? *medigraphic*. 2008 Noviembre-Diciembre.

Dorronsoro C, García de la Cera E, Llorente L, Barbero S, Marcos S. Implementación de dos aberrómetros para aplicaciones biomédicas. Madrid, *Óptica*.

Espinosa J, Mas D, Pérez J, Hernández C, Vázquez C, Miret JJ, et al. Determinación de la aberración cromática longitudinal en ojos humanos. *Ver y Oír*. 2005 Noviembre.

François J. *Óptica fisiológica clínica. Refracción*. Quinta ed. Rio EGd, editor. Barcelona: Toray S.A; 1984.

Fujikado T, Kuroda T, Sayuri N, Naoyuki M, Tano Y, Oshika T, et al. Age-related changes in ocular and corneal aberrations. *Brief reports*. 2004 Junio; 138(1).

Gené Sampedro A, Piñero Llorens DP, Ondategui Parra C. Interocular differences in visual quality due to ocular aberrations and scattering in a patient with post-traumatic anisocoria: A case report. *Journal of Optometry*. 2012 Enero; 5.

Gil del Río E. *Optica fisiológica clínica*. 5th ed. Barcelona: Toray; 1984.

Gispets Parcerisas , González Anera R, López Gil N, Merayo-Lloves J, Rodríguez Zarzuelo G, Villa Collar C. *Aberraciones oculares aspectos clínicos* Madrid: Colegio Nacional de Ópticos-Optometristas de España; 2005.

Guirao A, Artal P. Off-axis monochromatic aberrations estimated from double pass measurements in the human eye. *Vision Research*. 1999 Agosto; 39.

Guirao Piñera A. *Calidad óptica del ojo humano en función de la edad*. 1998 Septiembre. Murcia.

Gutiérrez Rodríguez N, Suárez Pisciotti E, Mario García S. Evaluación de las aberraciones de alto orden corneales y oculares mediante el índice Root Mean Square (RMS) con dos lentes de contacto blandos esféricas en pacientes con astigmatismo miópico bajo. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*. 2011 Diciembre; 9(2).

Harilaos G, Sotiris P, Aristophanis P. Variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using a clinical Shack-Hartmann aberrometer. *Biomed Central*. 2004 Febrero; 4.

Izquierdo Delgado P. *Estudio sobre aberraciones oculares y queratoconos*. 2011 Junio. Universitat Politècnica de Catalunya.

Karpecki P. Progressive measurement of dry eye using wavefront analyzer. *Optometry Times*. 2012 Noviembre.

Larry T, Hong X. Clinical Applications of the Shack-Hartmann Aberrometer. *Optometry and Vision Science*. 1999 Diciembre; 76(12).

López Miguel A, Martínez Almeida L, González García J, Coco Martín B, Sobrado Calvo P, Maldonado MJ. Precision of higher-order aberration measurements with a new Placido-disk topographer and Hartmann-Shack wavefront sensor. *Journal of cataract & Refractive Surgery*. 2013 Febrero; 39.

Maeda N, Bissen-Miyajima H, Fujikado T, Inoue Y. Wave-Front analyzer. 2010 Mayo.

Manterola C, Pineda V, Mincir G. El valor de "p" y la "significación estadística". *Aspectos generales y su valor en la práctica clínica*. Chilena de Cirugía. 2008 Febrero; 60(1).

Marcos S. *Calidad óptica del ojo*. Investigación y Ciencia. 2005 Junio.

Martínez Roda A. Normalización de los resultados de calidad óptica ocular proporcionados por OQAS. 2010 Enero. Universitat Politècnica de Catalunya.

McLellan JS, Marcos S, Burns SA. Age-Related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2011 Mayo; 42(6).

Mejía Barbosa Y. El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike. *Ciencia y Tecnología para la Salud Visual y Ocular*. 2011 Diciembre; 9(2).

Montés Micó R. Cambios en las aberraciones ópticas tras la instilación de lágrimas artificiales en pacientes con ojo seco. *Gaceta óptica*. 2006 Abril; 11(403).

Montés Micó R. Efecto positivo y negativo de las aberraciones ópticas en la calidad de la imagen retiniana. *Gaceta óptica*. 2005 Diciembre; 11(399).

Ninomiya S, Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Tano Y, Oshika T, et al. Changes of ocular aberration with accommodation. *American Journal of ophthalmology*. 2002 Diciembre; 134(6).

Pailos Núñez E. Estadística espacial de las aberraciones oculares a partir de los centroides de sensores Hartmann-Shack. 2011 Septiembre. Universidad de Santiago de Compostela.

Peréz Sánchez GM. Estudio de la difusión intraocular y desarrollo de un nuevo sistema de medida. Octubre 2009. Murcia.

Peris March E. Repetibilitat de les mesures de la qualitat òptica ocular amb OQAS. 2010 Enero. Universitat Politècnica de Catalunya.

Piñero DP, Tomás Juan J, Alió L. Intrasubject repeatability of internal aberrometry obtained with a new integrated aberrometer. *Journal of Refractive Surgery*. 2010 Diciembre; 27(7).

Pisella PJ. KR-1W: The all-in-one visual function evaluator. Topcon Medical Systems. 2012 Abril.

Radhakrishnan H, Charman WN. Age-Related changes in ocular aberrations with accommodation. *Journal of Vision*. 2007 Mayo; 7(11).

Rodríguez S, Smith-Agreda JM. Anatomía de los órganos del lenguaje, visión y audición. Segunda ed. Madrid: Panamericana; 2003.

Salmon T, Van de Pol C. Accuracy, repeatability and Instrument Myopia Induced by a Clinical Aberrometer the Complete Ophthalmic Analysis System (COAS). 2006 Junio..

Salmon T, Van de Pol C. Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*. 2006 Diciembre; 32.

Santiago Rodríguez JM, Smith A. Anatomía de los órganos del lenguaje. Segunda ed. Madrid: Médica Panamericana ; 1938.

Suárez Pisciotti E, Gutiérrez Rodríguez N. Evaluación de las aberraciones corneales y oculares mediante el índice RMS de alto orden, con dos lentes de contacto blandos esféricas en pacientes con astigmatismo miópico bajo. 2011 Mayo. Universidad de la Salle.

Taberner J, Benito A, Alcón E, Artal P. Mechanism of compensation for aberrations in the human eye. *Journal of the Optical Society of America*. 2007 Octubre; 24(10).

Topcon. Manual de instrucciones analizador de frente de onda KR-1W. 2009 Diciembre.

Vidal Olarte R. Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas. Ciencia y Tecnología para la salud visual y ocular. 2011 Diciembre; 9(2).

Wang Y, Zhao K, Jin Y, Niuy Z. Changes of higher order aberration with various pupil sizes in the myopic eye. Journal of Refractive Surgery. 1995; 5.

Yang X, Wang Y, Zhao K, Fang L. Comparison of higher-order aberration and optical quality after Epi-LASIK and LASIK for myopia. Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology. 2011; 249.

## **ANEXOS**

### **ANEXO I:**

#### **CONSENTIMIENTO INFORMADO**

## **Estudio de las aberraciones oculares y corneales en función de la edad.**

### **Propósito del estudio:**

Está invitado a participar en un estudio sobre las aberraciones oculares y corneales en función de la edad. Con el presente estudio se pretende comparar las aberraciones presentes entre una población joven y una población mayor de 50 años.

Ha sido seleccionado como posible participante de este estudio porque sus características oculares se encuentran dentro del protocolo establecido.

### **Condiciones del estudio:**

La prueba será breve, duración total unos 15/20 min por persona. Primero realizaré la medida de AV monocular con la graduación correspondiente de cada persona, y después con el aberrómetro Topcon KR-1W, realizaré tres medidas en cada ojo en condiciones de baja iluminación, y tres medidas más en cada ojo en condiciones de alta iluminación.

### **Riesgos que extraña el presente estudio:**

En nuestra experiencia no ha sido causado ningún daño significativo en la realización de esta prueba.

Para cualquier duda o problema puede ponerse en contacto con: Irene Claramunt.

Tlf: 6xxxxxxx o [Irene\\_claramunt@hotmail.com](mailto:Irene_claramunt@hotmail.com)

## CONSENTIMIENTO INFORMADO

D/Dña. \_\_\_\_\_ con DNI núm  
\_\_\_\_\_ y \_\_\_\_\_ años de edad, con domicilio en \_\_\_\_\_  
provincia de \_\_\_\_\_ manifiesto que he sido informado/a por Irene Claramunt  
sobre los detalles del trabajo que lleva por título “Estudio de las aberraciones oculares y  
corneales en función de la edad”.

Su decisión de participar o no en el estudio es enteramente voluntaria en cualquier momento  
puede dejar de colaborar con el proyecto sin tener que dar ninguna explicación a los  
investigadores y sin ningún tipo de perjuicio.

Declaro que todas mis dudas y preguntas han sido aclaradas, que he comprendido toda la  
información que se me ha proporcionado. Por ello doy mi consentimiento para participar en el  
estudio. Estoy de acuerdo en que mis datos relativos a este estudio sean almacenados,  
procesados electrónicamente y transmitidos, por lo que doy mi consentimiento para que se  
revele la información necesaria recogida en el estudio para que pueda ser procesada y  
difundida a la comunidad científica, sin que en ningún momento sea revelada mi identidad ya  
que entiendo que mis derechos de confidencialidad quedan protegidos.

En \_\_\_\_\_, a \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

Firma del paciente

Firma del investigador



**ANEXO II:****FICHA DEL PACIENTE****Estudio de las aberraciones oculares y corneales en función de la edad.**

Irene Claramunt (Estudiante de óptica y optometría)

Necesito voluntarios interesados en hacer de pacientes para mi trabajo final de grado. El trabajo consiste en realizar un estudio de las aberraciones de alto orden que presentan nuestros ojos. Esos datos serán comparados entre una población joven (18-25 años) y una población adulta (mayor de 50 años).

La prueba será breve, duración total unos 15/20 min por persona. Primero realizaré la medida de AV monocular con la graduación correspondiente de cada persona, y después con un aberrómetro, tomaré dos medidas en cada ojo, obteniendo la graduación objetiva, los valores queratométricos, y las aberraciones.

Localización: La prueba se realizará en un centro de la UPC llamado CD-6 (Rambla Sant Nebridi, 10).

Agradecería mucho vuestra ayuda. Necesito una población amplia de pacientes. Por lo que si conocéis de alguien más interesado o que quisiera colaborar, podéis pasarle esta misma ficha.

Nombre:

Edad:

Teléfono de contacto:

Correo electrónico:

¿Crees tener buena visión en ambos ojos? (En el caso de utilizar gafas aunque sea ocasionalmente, deberás venir con ellas a realizar la prueba).

¿Eres usuario habitual de lentes de contacto?

En el caso de que la respuesta sea sí, ¿Qué tipo de LC rígidas o blandas? ¿Con qué frecuencia las utilizas? (Recordar que has de hacer un descanso de 48 horas sin LC antes de venir a hacer la prueba).

¿Te has operado alguna vez de los ojos? Si la respuesta es sí, ¿De qué?

¿Te han diagnosticado alguna patología ocular, actualmente o de más pequeño? Si la respuesta es sí, ¿Cuál?

¿Te pones algún tipo de gotas oculares? ¿Cuáles? (Se incluyen las lágrimas artificiales). (En el caso de que la respuesta sea sí, la última gota no tendrá que haberse puesto durante la hora antes de realizar la prueba).

Disponibilidad que tienes para hacer las pruebas:

Podéis enviarme la ficha por correo electrónico: [irene\\_claramunt@hotmail.com](mailto:irene_claramunt@hotmail.com)

¡Muchas gracias por vuestra colaboración! 😊

**ANEXO III:****REGISTRO DEL PACIENTE**

Fecha:

Hora:

Examinadora:

ID (E):

ID (F):

Nombre:

Fecha de nacimiento

Edad:

Teléfono de contacto:

Correo electrónico:

¿Utiliza gafas?

¿Visión de lejos?

¿Visión de cerca?

Rx Gx: OD:

OI:

¿Utilizas Lentes de contacto?

¿Blandas o Rígidas?

¿Con que frecuencia las utilizas?

¿Cuándo fue el último día que te las pusiste?

¿Utilizas fármacos oculares? (Incluidas las lágrimas artificiales)

¿Cuál/Cuáles?

¿Cuánto tiempo hace de su último uso?

¿Te han diagnosticado alguna patología ocular?

¿Cuál/Cuáles?

¿Y alguna patología sistémica?

¿Cuál/Cuáles?

¿Tomas algún fármaco?

¿Cuál/Cuáles?

AVcc monocular VL:

OD:

OI:

**ANEXO IV**

BAJA ILUMINACIÓN	
OD	3 medidas de la refracción objetiva
	3 medidas del diámetro pupilar
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones totales
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de una estimación de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden por separado de las aberraciones totales
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden totales
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden internas
OI	3 medidas de la refracción objetiva
	3 medidas del diámetro pupilar
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones totales
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de una estimación de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden por separado de las aberraciones totales
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden totales
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden internas

Tabla 1. Tabla de las medidas obtenidas de cada individuo y en cada ojo, utilizando el test de baja iluminación.

ALTA ILUMINACIÓN	
OD	3 medidas de la refracción objetiva
	3 medidas del diámetro pupilar
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones totales
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de una estimación de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden por separado de las aberraciones totales
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden totales
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden internas
OI	3 medidas de la refracción objetiva
	3 medidas del diámetro pupilar
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones totales
	3 medidas de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de una estimación de los coeficientes de Zernike hasta 6º orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden por separado de las aberraciones totales
	3 medidas del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para cada orden de las aberraciones internas
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden totales
	3 medidas del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden corneales
	3 medidas de la estimación del cálculo de RMS para las aberraciones de alto orden internas

Tabla 2. Tabla de las medidas obtenidas de cada individuo y en cada ojo, utilizando el test de alta iluminación.

**ANEXO V**

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Toda la muestra	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	6,406	$\pm 1,344$	2,78	8,60
		S3	0,404	$\pm 0,203$	0,083	1,016
		S4	0,272	$\pm 0,174$	0,038	0,921
		S5	0,099	$\pm 0,071$	0,021	0,449
		S6	0,070	$\pm 0,035$	0,017	0,194
		S HOA	0,517	$\pm 0,251$	0,121	1,190
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	4,658	$\pm 1,072$	2,45	7,40
		S3	0,165	$\pm 0,083$	0,044	0,534
		S4	0,097	$\pm 0,051$	0,030	0,370
		S5	0,045	$\pm 0,027$	0,012	0,219
		S6	0,035	$\pm 0,014$	0,014	0,090
		S HOA	0,205	$\pm 0,093$	0,071	0,619

Tabla 3. Tabla descriptiva de los resultados de toda la muestra, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones totales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.4.1)

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Jóvenes	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	7,345	$\pm 0,870$	5,37	8,60
		S3	0,454	$\pm 0,211$	0,083	1,016
		S4	0,326	$\pm 0,182$	0,038	0,921
		S5	0,123	$\pm 0,087$	0,034	0,449
		S6	0,086	$\pm 0,039$	0,028	0,194
		S HOA	0,599	$\pm 0,253$	0,121	1,180
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	5,331	$\pm 0,929$	3,62	7,40
		S3	0,180	$\pm 0,099$	0,048	0,534
		S4	0,110	$\pm 0,060$	0,042	0,370
		S5	0,048	$\pm 0,032$	0,012	0,219
		S6	0,037	$\pm 0,016$	0,014	0,090
		S HOA	0,227	$\pm 0,109$	0,077	0,619

Tabla 4. Tabla descriptiva de los resultados de los jóvenes, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones totales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.4.1)

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Mayores	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	5,468	$\pm 1,045$	2,78	7,14
		S3	0,353	$\pm 0,183$	0,113	0,952
		S4	0,219	$\pm 0,148$	0,064	0,713
		S5	0,072	$\pm 0,036$	0,021	0,159
		S6	0,054	$\pm 0,023$	0,017	0,115
		S HOA	0,434	$\pm 0,223$	0,147	1,190
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	3,985	$\pm 0,729$	2,45	5,46
		S3	0,149	$\pm 0,061$	0,044	0,289
		S4	0,085	$\pm 0,037$	0,030	0,251
		S5	0,042	$\pm 0,020$	0,018	0,115
		S6	0,032	$\pm 0,012$	0,016	0,070
		S HOA	0,184	$\pm 0,068$	0,071	0,390

Tabla 5. Tabla descriptiva de los resultados de los mayores, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones totales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.4.1)

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Toda la muestra	S3	0,119	$\pm 0,087$	0,040	0,788
	S4	0,066	$\pm 0,067$	0,018	0,574
	S5	0,032	$\pm 0,029$	0,011	0,219
	S6	0,026	$\pm 0,019$	0,008	0,124
	S HOA	0,146	$\pm 0,113$	0,057	1,014

Tabla 6. Tabla descriptiva de los resultados de toda la muestra, en pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberración. (Apartado 5.4.2)

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Jóvenes	S3	0,082	$\pm 0,033$	0,040	0,184
	S4	0,049	$\pm 0,025$	0,018	0,150
	S5	0,026	$\pm 0,011$	0,011	0,064
	S6	0,020	$\pm 0,009$	0,008	0,044
	S HOA	0,104	$\pm 0,039$	0,057	0,249

Tabla 7. Tabla descriptiva de los resultados de los jóvenes, en pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberración. (Apartado 5.4.2)

ABERRACIONES TOTALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Mayores	S3	0,157	$\pm 0,107$	0,054	0,788
	S4	0,081	$\pm 0,089$	0,029	0,574
	S5	0,039	$\pm 0,040$	0,012	0,219
	S6	0,031	$\pm 0,025$	0,008	0,124
	S HOA	0,189	$\pm 0,143$	0,077	1,014

Tabla 8. Tabla descriptiva de los resultados de los mayores, en pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberración. (Apartado 5.4.2)

**ANEXO VI**

ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Toda la muestra	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	6,406	$\pm 1,344$	2,78	8,60
		S3	0,403	$\pm 0,253$	0,061	1,875
		S4	0,387	$\pm 0,288$	0,026	1,413
		S5	0,106	$\pm 0,126$	0,015	0,914
		S6	0,084	$\pm 0,087$	0,013	0,598
		S HOA	0,595	$\pm 0,389$	0,078	2,591
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	4,658	$\pm 1,072$	2,45	7,40
		S3	0,166	$\pm 0,099$	0,029	0,537
		S4	0,116	$\pm 0,098$	0,023	0,499
		S5	0,053	$\pm 0,033$	0,017	0,188
		S6	0,045	$\pm 0,028$	0,010	0,148
		S HOA	0,224	$\pm 0,133$	0,057	0,769

Tabla 9. Tabla descriptiva de los resultados de toda la muestra, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.5.1)

ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Jóvenes	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	7,345	$\pm 0,870$	5,37	8,60
		S3	0,462	$\pm 0,212$	0,134	0,972
		S4	0,547	$\pm 0,267$	0,123	1,288
		S5	0,141	$\pm 0,116$	0,034	0,557
		S6	0,115	$\pm 0,080$	0,030	0,425
		S HOA	0,759	$\pm 0,337$	0,252	1,729
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	5,331	$\pm 0,929$	3,62	7,40
		S3	0,186	$\pm 0,115$	0,054	0,537
		S4	0,162	$\pm 0,117$	0,031	0,499
		S5	0,062	$\pm 0,040$	0,019	0,188
		S6	0,057	$\pm 0,032$	0,018	0,148
		S HOA	0,272	$\pm 0,158$	0,096	0,769

Tabla 10. Tabla descriptiva de los resultados de los jóvenes, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.5.1)



ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo	
Mayores	Baja iluminación	$\phi$ pupilar	5,468	$\pm 1,045$	2,78	7,14
		S3	0,344	$\pm 0,278$	0,061	1,875
		S4	0,227	$\pm 0,209$	0,026	1,413
		S5	0,070	$\pm 0,128$	0,015	0,914
		S6	0,053	$\pm 0,083$	0,013	0,598
		S HOA	0,431	$\pm 0,370$	0,078	2,591
	Alta iluminación	$\phi$ pupilar	3,985	$\pm 0,729$	2,45	5,46
		S3	0,146	$\pm 0,077$	0,029	0,359
		S4	0,071	$\pm 0,036$	0,023	0,194
		S5	0,444	$\pm 0,225$	0,017	0,109
		S6	0,033	$\pm 0,016$	0,010	0,095
		S HOA	0,177	$\pm 0,080$	0,057	0,426

Tabla 11. Tabla descriptiva de los resultados de los mayores, en función del diámetro pupilar con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales tanto con baja como con alta iluminación. (Apartado 5.5.1)

ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Toda la muestra	S3	0,114	$\pm 0,537$	0,034	0,307
	S4	0,062	$\pm 0,031$	0,022	0,210
	S5	0,029	$\pm 0,021$	0,008	0,127
	S6	0,019	$\pm 0,014$	0,003	0,082
	S HOA	0,139	$\pm 0,063$	0,060	0,414

Tabla 12. Tabla descriptiva de los resultados de toda la muestra, pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales. (Apartado 5.5.2)

ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Jóvenes	S3	0,095	$\pm 0,048$	0,034	0,307
	S4	0,059	$\pm 0,033$	0,026	0,210
	S5	0,028	$\pm 0,020$	0,008	0,098
	S6	0,016	$\pm 0,012$	0,003	0,068
	S HOA	0,119	$\pm 0,059$	0,060	0,394

Tabla 13. Tabla descriptiva de los resultados de los jóvenes, pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales. (Apartado 5.5.2)

ABERRACIONES CORNEALES (en $\mu\text{m}$ )		Media aritmética	Desviación estándar	Valor mínimo	Valor máximo
Mayores	S3	0,134	$\pm 0,053$	0,049	0,291
	S4	0,065	$\pm 0,029$	0,022	0,195
	S5	0,031	$\pm 0,023$	0,010	0,127
	S6	0,022	$\pm 0,015$	0,006	0,082
	S HOA	0,158	$\pm 0,062$	0,071	0,414

Tabla 14. Tabla descriptiva de los resultados de los mayores, pupila de 4 mm con los valores de RMS para cada orden de aberraciones corneales. (Apartado 5.5)

