



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

TRABAJO FINAL DE GRADO

COMPARACIÓN DE LA AGUDEZA VISUAL EN VISIÓN DE CERCA Y VISIÓN DE LEJOS BAJO DIFERENTES ILUMINACIONES EN UNA MUESTRA DE POBLACIÓN INFANTIL

KATTYA DAYANA LÓPEZ ABAD

AURORA TORRENTS GÓMEZ
M^a SAGRARIO MILLÁN GARCÍA-VARELA
DEPARTAMENTO ÓPTICA Y OPTOMETRÍA

JUNIO 2019



GRAU EN ÒPTICA I OPTOMETRIA

COMPARACIÓN DE LA AGUDEZA VISUAL EN VISIÓN DE CERCA Y VISIÓN DE LEJOS BAJO DIFERENTES ILUMINACIONES EN UNA MUESTRA DE POBLACIÓN INFANTIL

RESUMEN

OBJETIVO

Analizar los valores de la agudeza visual (AV) en una población joven y sana, en función del color de la luz que incide sobre el optotipo (rojo, azul, verde y blanco) y la distancia de observación (lejos-cerca). Además, se hará una comparativa de los resultados obtenidos con otros estudios científicos.

METODOLOGÍA

El estudio se ha realizado con una muestra de 10 pacientes, 5 mujeres y 5 hombres, con edades comprendidas entre los 9 y 16 años. La parte experimental se ha desempeñado en un banco óptico y el proceso de montaje se divide en 3 partes: creación e impresión del optotipo, calibración de las luces LED y montaje final. El procedimiento es el siguiente: se sitúa el optotipo a 33 cm del sujeto, el cual irá colocado en una mentonera, y se ilumina el optotipo mediante los cuatro iluminantes LED. Se anotará en cada caso la máxima agudeza visual a la que llega el observador, tanto en visión próxima como en visión lejana. Por lo tanto, se obtienen 8 medidas totales por sujeto.

CONCLUSIÓN

La mejor AV se ha obtenido con el LED verde y el blanco, ya que las imágenes con ambas luces se enfocarán en la retina. La AV con la luz roja es similar a las AV con la luz verde y blanca, ya que para las longitudes de onda largas el ojo actúa como si fuese hipermetrope y puede compensar mediante la acomodación la falta de potencia. En cambio, la luz azul provoca un efecto de miopía, la cual no puede ser compensada por el sistema visual. Por tanto, la aberración cromática sí afecta al rendimiento visual.

RESUM

OBJECTIU

Analitzar els valors de la agudesa visual (AV) en una població jove i sana, en funció dels tipus de color de la llum que incideixen sobre l'optotip (vermell, blau, verd i blanc) i la distància d'observació (lluny-prop). A més a més, es farà una comparació amb els resultats obtinguts amb altres estudis científics.

METODOLOGIA

L'estudi s'ha realitzat amb una mostra de 10 pacients, 5 dones y 5 homes, amb un rang d'edats entre els 9 y 16 anys. La part experimental s'ha dut a terme en un banc òptic i el procés de muntatge es divideix en 3 parts: creació e impressió de l'optotip, calibratge de les llums LED i el muntatge final. El procediment es el següent: es col·loca l'optotip a 33 cm del subjecte, que estarà col·locat en una mentonera, i s'il·lumina l'optotip mitjançant les quatre il·luminats LED. Anotarem en cada cas la màxima agudesa visual que aconsegueix l'observador, tant per visió propera com per visió llunyana. Per tant, s'obindrà 8 mesures totals per subjecte.

CONCLUSIÓ

La millor AV s'obté amb el LED verd i el blanc, ja que les imatges amb les dues llums s'enfocaran sobre la retina. L'AV amb la llum vermella és similar a les AV amb la llum verda i blanca, ja que amb longituds d'ona llarga l'ull actua com si fos hipermetrop i podrà compensar mitjançant l'acomodació la falta de potència. En canvi, la llum blava provoca un efecte de miopia, la qual no podrà ser compensada pel sistema visual. Per tant, l'aberració cromàtica sí afecta el rendiment visual.

SUMMARY

PURPOSE

To analyze the values of visual acuity (VA) in a young and healthy population, depending on the color of the light that affects the optotype (red, blue, green and white) and the distance of observation (far-near). In addition, a comparison of the results obtained with other scientific studies will be made.

METHODOLOGY

The study was conducted with a sample of 10 patients, 5 women and 5 men, aged between 9 and 16 years. The experimental part has been carried out in an optical bench and the assembly process is divided into 3 parts: creation and printing of the optotype, calibration of the LED lights and final assembly. The procedure is as follows: the optotype is placed 33 cm from the subject, which will be placed in a chin bar, and the optotype is illuminated by the four LED illuminants. The maximum visual acuity to which the observer arrives will be noted in each case, both in near vision and in distant vision. Therefore, 8 total measurements per subject are obtained.

CONCLUSIONS

The best VA has been obtained with the green and white LED since the images with both lights will focus on the retina. The VA with the red light is similar to the VA with the green and white light, since for the long wavelengths the eye acts as if it were hyperopic and can compensate by means of the accommodation the lack of power. On the other hand, blue light causes an effect of myopia, which cannot be compensated by the visual system. Therefore, chromatic aberration does affect visual performance.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
2. OBJETIVOS	9
2.1 Objetivos generales.....	9
2.2 Objetivos específicos	9
3. MARCO TEÓRICO	9
3.1 AGUDEZA VISUAL	10
3.1.1 Definición	10
3.1.2 Métodos de medida y tipos de escalas	10-12
3.1.3 Tipos de Optotipos	13
3.1.4 Factores que limitan la medición de la AV.....	14
3.2 ABERRACIÓN CROMÁTICA	14
3.2.1 Definición.....	14-17
3.2.2 Clasificación Aberración cromática.....	17-18
3.2.3 Magnitud de la ACL	19-20
3.2.4 Agudeza visual cromática	20
3.3 ACOMODACIÓN	21
3.3.1 Simulación AV en visión lejana.....	21
4. MÉTODO EXPERIMENTAL	22
4.1. Muestra de pacientes.....	22
4.2. Material.....	22
4.2.1 Calibración de las luces LED.....	23
4.2.2 Espectro de las luces LED.....	24
4.2.3 Técnica de impresión del Optotipo.....	24-25
4.3. Procedimiento	25-26
5. RESULTADOS.....	27
5.1. Resultados de AV cromática en VP.....	28-29
5.2. Resultados de AV cromática en VL	30-31
5.3. Resultados de AV cromática según el género.....	32-34



6. CONCLUSIONES.....	35-36
7. REFERENCIAS.....	37-38
8. ANEXO	39

1. INTRODUCCIÓN

Como es sabido, el ojo es un sistema óptico formado por 2 lentes, la córnea y el cristalino. Ambas lentes son positivas y crean una imagen de aquello que se mira sobre la retina que, posteriormente, se codifica y transmite hacia las áreas de la corteza visual. Además, igual que otros sistemas ópticos, el ojo tiene límites en su rendimiento y estará predispuesto por un conjunto de factores físicos y fisiológicos que influenciarán en la resolución y calidad de la imagen.

El sistema visual presenta diversos mecanismos necesarios para que exista el sentido de la visión. Entre ellos encontramos: la capacidad acomodativa del cristalino para enfocar a diferentes distancias, la adaptación del iris en condiciones fotópicas y escotópicas o la habilidad de los músculos extraoculares para aportar movilidad. El conjunto final proporciona una buena resolución y calidad de las imágenes.

Por otro lado, aún y tener las buenas propiedades mencionadas, el sistema visual puede verse condicionado por factores que limitan el rendimiento visual y entre ellos encontramos los siguientes ejemplos:

1. La naturaleza de la luz (difracción y dispersión).
2. Las aberraciones oculares (aberración esférica y aberración cromática)
3. Patologías oculares.
4. Anatomía visual: Irregularidad en la superficie de la córnea, cambios en el índice de refracción del cristalino, etc.

En este trabajo nos centraremos en el impacto de la aberración cromática sobre la agudeza visual en una población joven, tanto en visión de lejos como en visión de cerca.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales

El objetivo general de este trabajo consiste en conocer si la agudeza visual de una muestra de población joven (9-16 años) se ve afectada por la composición espectral de la luz que ilumina el test, así como si existen diferencias entre visión de lejos y visión de cerca. Un segundo objetivo es analizar la eficacia de un sistema de simulación de la visión lejana en banco óptico mediante lente positiva.

2.2 Objetivos específicos

Con la finalidad de poder conseguir los objetivos generales propuestos se debe llevar a cabo una serie de procedimientos. Será necesario realizar una calibración de las luces LED, diseñar un optotipo adecuado para el estudio y averiguar los mejores métodos de impresión de éste, conseguir el colectivo de sujetos que cumplan con los requisitos para realizar la prueba y, finalmente, buscar la bibliografía pertinente para poder realizar una comparativa con los resultados obtenidos en la parte experimental.

3. MARCO TEÓRICO

En primer lugar, empezaremos definiendo el concepto de la agudeza visual y, a continuación se explicará los métodos que existen para realizar esta medida. Por otro lado, también se hablará sobre la influencia de los factores físicos del estímulo y los factores ópticos que intervienen en el sistema visual, poniendo énfasis en cómo actúa la aberración cromática sobre la agudeza visual.

Por otra parte, también se mencionará cómo se ha conseguido simular la agudeza visual en visión lejana y de la influencia de la acomodación.

3.1. AGUDEZA VISUAL

3.1.1 Definición

La agudeza visual es la capacidad de resolución de un ojo que permite percibir y diferenciar estímulos separados por un ángulo determinado (α). La AV se obtiene mediante la inversa del ángulo con el que se resuelve el objeto más pequeño.

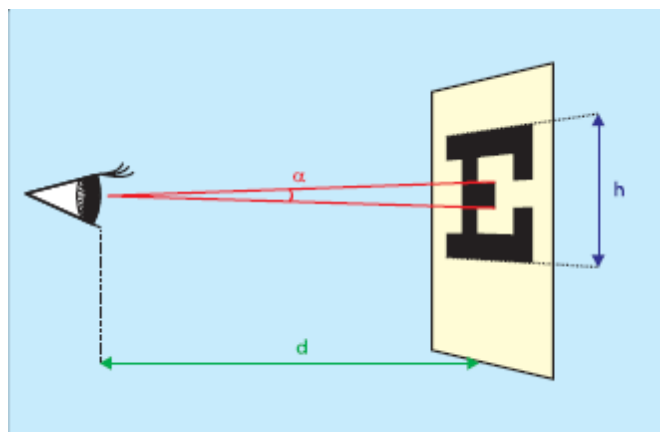


Figura 1. Fórmula para obtener la agudeza visual ($AV = 1/(\alpha)$). Tamaño angular (α) en la medida de la AV, donde d es la distancia del sujeto al optotipo y h es la altura de este. (R. Martín, G. Vecilla, 2011)

El valor de la agudeza visual nos permite conocer la capacidad de discriminación del sistema visual y posibilita determinar si existe algún defecto refractivo, ya que estos provocan una disminución de la AV según el valor de la ametropía. Por otra parte, la disminución de la AV también puede deberse a una patología ocular o bien por alguna patología sistémica.

En resumen, clínicamente se considera "correcto" el 100% (la unidad) de AV y es aquella en la que el sujeto tiene la capacidad de discernir el detalle más pequeño del test y puede verse influenciada por factores físicos, fisiológicos y psicológicos. (R. Martín, G. Vecilla, 2011) (Borràs, M.R, et al., 1999)

3.1.2 Métodos de medida y tipos de escalas

La AV se determina al principio del examen visual y posteriormente si se ha encontrado un defecto refractivo, con la corrección pertinente. Esta prueba se debe realizar de forma rutinaria en el examen visual, se puede medir de forma monocular o binocular, de lejos y de cerca y con o sin corrección.

A. Descripción del procedimiento:

1. Se presenta el optotipo a distancia que se desea comprobar la AV (a 6 m en visión de lejos, VL y a 33 - 40 cm en visión próxima, VP).
2. El gabinete debe tener un nivel de iluminación media y el optotipo bien iluminado.
3. Empezamos proyectando el optotipo de mayor tamaño (baja AV) a menor tamaño cada vez que el paciente reconozca el estímulo.
4. Se ocluye el ojo izquierdo y se mide la AV monocular del ojo derecho, una vez obtenida la máxima AV pasamos al otro ojo.
5. Se mide la AV binocular con ambos ojos abiertos.
6. En VL el gabinete debe de estar en condiciones de penumbra y en VP a 40 cm se debe iluminar correctamente el optotipo y con la sala iluminada.

B. Tipos de escalas y anotación de la AV

1. Escala Decimal

Hoy en día en España, la escala decimal se considera la más utilizada para medir la AV. El valor decimal se obtiene mediante la resolución de la fracción de Snellen, por ejemplo, la máxima AV sería $20/20=1,0$ e iría disminuyendo hasta $20/200=0,1$. (R. Martin, G. Vecilla, 2011)

2. Escala Snellen

Los optotipos con escala aritmética o tipo Snellen se basan en que cada letra puede inscribirse en un cuadrado cinco veces mayor que el grosor de la línea con la que está trazada. El mínimo discriminable se medirá con un optotipo que presente una línea con un valor angular de 1 minuto de arco y la totalidad del mismo será de 5 minutos de arco.

La anotación en esta escala se realiza a través de una fracción que expresa el tamaño angular del optotipo, la distancia de presentación del test (en pies o ft en inglés) y el tamaño del test. Se anota la distancia del optotipo en el numerador y su tamaño en el denominador.

La máxima AV se obtiene cuando el sujeto identifica a 20 pies la letra que a 20 pies subtende un ángulo de 5 minutos de arco, por tanto la fracción de Snellen correspondiente a la máxima AV será 20/20. (R. Martin, G. Vecilla, 2011)

3. Escala logarítmica

Los optotipos de escala logarítmica o de Bailey-lovie pretenden conseguir la máxima estandarización en la medida de la AV y para ello se necesitan una serie de requisitos:

- Progresión logarítmica: la progresión de 0,1 unidades logarítmicas se considera el ratio más adecuado.
- Número de optotipos por línea: al menos deben existir 5 letras por línea de optotipos y en cada nivel de AV debe haber el mismo número para que aumente la fiabilidad de la prueba.
- Espacio entre letras y filas: el espacio entre filas y entre letras tiene que ser igual que el tamaño de las letras.

Los optotipos que presentan una escala de progresión logarítmica están compuestas por cinco letras por línea y la misma separación entre las filas. Esta escala proporciona que cada optotipo tenga un valor de 0,02 unidades logarítmicas ($0,02 \times 5 = 0,1$).

De este modo, se considera más precisa la forma de medir la AV y normalmente se suele invertir el resultado a la escala decimal, ya que la máxima AV en log MAR tiene el valor de 0. (R. Martin, G. Vecilla, 2011)

Snellen (m)	Snellen (ft)	Decimal	LogMAR
6/3	20/10	2,00	-0,3
6/3,75	20/12,5	1,60	-0,2
6/5	20/16	1,25	-0,1
6/6	20/20	1,00	0,0
6/7,5	20/25	0,80	+0,1
6/10	20/32	0,63	+0,2
6/12	20/40	0,50	+0,3
6/15	20/50	0,40	+0,4
6/20	20/63	0,32	+0,5
6/24	20/80	0,25	+0,6
6/30	20/100	0,20	+0,7
6/38	20/125	0,16	+0,8
6/48	20/160	0,125	+0,9
6/60	20/200	0,1	+1,0

Figura 2. Equivalencia de los distintos métodos de anotación de la AV según la escala utilizada (R. Martin, G. Vecilla, 2011)

3.1.3 Tipos de Optotipos

Hoy en día, existen diversos tipos de optotipos que varían según el tipo de sujeto al cual se realiza la prueba.

1. Optotipos especiales para VL

En visión lejana encontramos un gran abanico de optotipos los cuales están adaptados a diferentes escalas y formas. La medida de la AV en VL se realiza a 6 metros de distancia y entre los optotipos más comunes encontramos los optotipos de letras (ETDRS, Sloan, etc.), los optotipos con formas direccionales (C de Landolt, E de Snellen, etc.) y los optotipos con números y dibujos indicados para poblaciones infantiles.

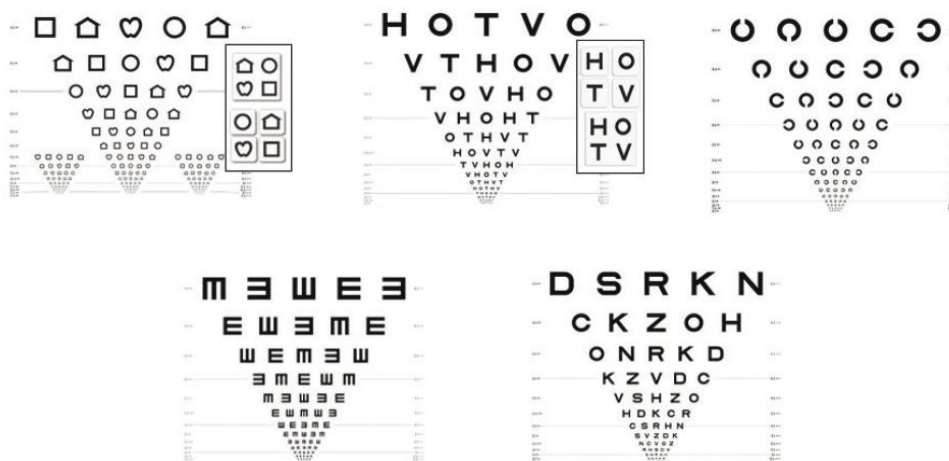


Figura 3. Optotipos con escala log MAR: símbolos de Lea, HOTV, C de Landolt, E de Snellen y ETDRS. (<http://archivos.pap.es>, 25/04/19)

2. Optotipos especiales para VP:

El procedimiento de medida de la AV en visión cercana acostumbra a ser el mismo que en VL exceptuando las condiciones de iluminación. La cantidad de optotipos utilizados para medir la AV en VP suelen ser escasos y la mayoría acostumbran a ser textos de lectura o bien versiones reducidas de los optotipos de VL.

3.1.4 Factores que limitan la medición de la AV

Existen una serie de parámetros que pueden afectar el resultado de la agudeza visual del sujeto. Consecuentemente, se ha clasificado en 4 grupos siguiendo una serie de criterios que se explicarán seguidamente. (R. Martín, G. Vecilla, 2011). (Artigas J.M. et al, 1995)

El primer grupo está compuesto por factores físicos que establecen alguna propiedad del estímulo: contraste, duración del estímulo, nivel de luminancia y distribución espectral de la luz, es decir, el color.

En segundo lugar, se incluyen los factores ópticos que influyen en el sistema visual: ametropías, tamaño y difracción pupilar, acomodación y aberraciones ópticas.

El tercer lugar lo forma el grupo de factores fisiológicos tales como: la edad del sujeto, la disposición de los receptores, el desarrollo de la corteza visual, etc.

Finalmente, se tienen en cuenta los factores psicológicos como la motivación del paciente, la experiencia previa con la prueba, etc.

Teniendo en cuenta el tema de este estudio nos centraremos en los factores ópticos que influyen sobre sistema ocular, principalmente en la aberración cromática.

3.2 ABERRACIÓN CROMÁTICA

3.2.1 Definición

La aberración cromática (AC) se produce por la dispersión de la luz blanca cuando atraviesa los medios del globo ocular, es decir, es debido a la diferencia del índice de refracción de los medios oculares y la longitud de onda que incide. Consecuentemente, no se forma una sola imagen sino un conjunto de imágenes de diferente tamaño y posición. El producto final será una imagen borrosa y deteriorada, lo cual provocará que se reduzca el poder de resolución del sistema visual. (M. Puell. 2014) (Sagrario, M., Escofet, J., Pérez, E. 2011) (Bennett and Rabbett's. 1998) (Slyusarev. G. G. 2008)

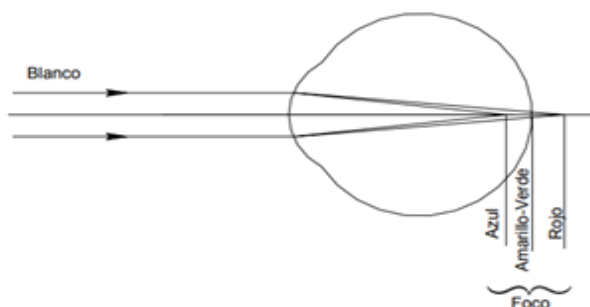


Figura 4. ACA en un ojo emétrepe, 3 puntos focales, azul, amarillo-verde y rojo. (M. Puell. 2014)

En la figura 4 observamos cómo inciden 3 tipos de radiaciones, azul, amarillo-verde y rojo. El haz de luz azul se refracta más y forma su imagen más anteriormente de la retina lo cual proporciona menos potencia, mientras que el rayo verde recaerá sobre la retina y recibe el nombre de longitud de onda de enfoque. Finalmente, el haz de luz roja será la menos refractada y aportará más potencia en el ojo al ser de longitud de onda larga. En conjunto, el producto final será una imagen borrosa.

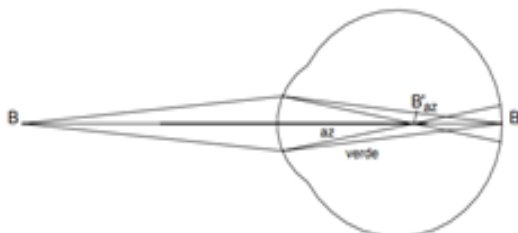


Figura 5. Aberración cromática longitudinal con luz verde y azul. (Puell, M. 2014)

La luz azul formará un halo alrededor del foco del punto de la luz verde y viceversa. Si la luz que incide en la lente contiene todas las longitudes de onda del espectro visible, los colores intermedios se enfocan entre los puntos focales de verde y azul en el eje.

La aberración cromática es causada porque el índice de refracción de los medios ópticos disminuye a medida que aumenta el valor de la longitud de onda. De este modo, para longitudes de onda corta (azul de 400 nm) se produce más refracción que en el caso de longitudes de onda largas (rojo de 700 nm), ésta variación provocará un cambio de potencia en el ojo para cada longitud de onda. Por lo cual las imágenes formadas por luz azul se formarán más próximas que las rojas.

El ojo emétrope se transformará en miope cuando la luz incidente sea azul y actuará como hipermetrope cuando la luz sea roja. Las longitudes de onda corta se enfocan de forma miópica y las longitudes de onda larga de forma hipermetrópica. En consecuencia, la AC origina una diferencia cromática de aumento en función de la longitud de onda. (Bennett and Rabbett's. 1998). (M. Puell. 2014)

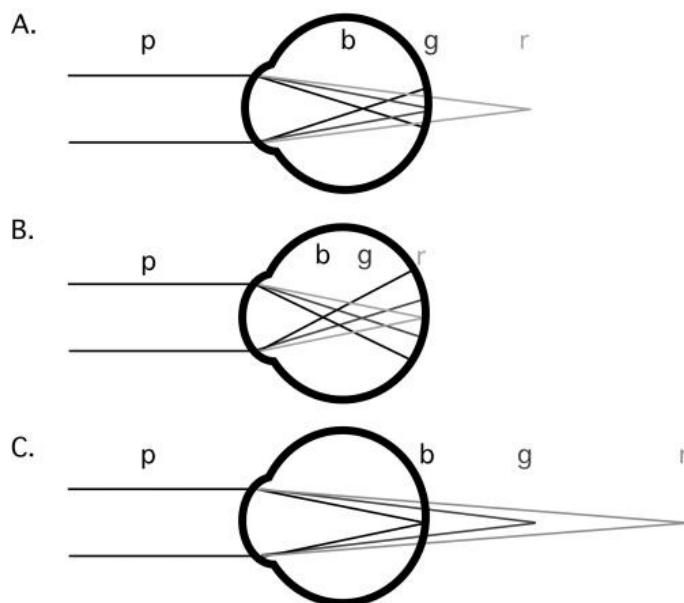


Figura 6. Ilustración esquemática de la ACL y los efectos del desenfoque miope o hipermetrope. (Jingyun Wang et al., 2008)

Como observamos en la figura anterior, la luz policromática (p) llega al ojo y se dispersa en sus diversas longitudes de onda. Las longitudes de onda corta (b=blue= azul) se refractan y proporcionan más potencia en el ojo en contraste con las de longitud media (g= green= verde) y larga (r= red= rojo).

A. En un ojo emétrope, las longitudes de onda medias (g) se enfocan sobre la retina.

B. En un ojo miope, con mayor longitud axial y más potencia, las longitudes de onda larga (r) se enfocarán sobre la retina.

C. En un ojo hipermetrope, con menor longitud axial y menor potencia, las longitudes de onda cortas (b) se enfocarán sobre la retina. (Jingyun Wang et al., 2008)

A pesar de la existencia de la AC no acostumbra a ser molesta y puede ser compensada por la eficiencia luminosa del ojo, la fisiología de la retina, el cristalino y al diámetro pupilar. (Puell, M. 2014)

Factores que compensan la AC:

- Eficiencia luminosa del ojo: el ojo no actúa de la misma forma para todas las radiaciones luminosas del espectro visible. Existe mayor sensibilidad luminosa en la longitud de onda de 550 nm (amarillo). Por el contrario, el valor de la sensibilidad disminuye en los espectros de luz azul- violeta y rojo.
- Distribución de los fotorreceptores en la retina: la zona que proporciona la máxima agudeza visual, la fóvea, tiene mayor densidad de conos y no contiene fotorreceptores sensibles a la luz azul y tampoco bastones, sólo conos con pigmento rojo y verde. Hay mayor sensibilidad para longitudes de onda medias y largas. En esta área central hay mayor sensibilidad en la percepción de detalles.
- Filtros selectivos: la mácula lútea es la zona central de la retina y está dotada de un pigmento carotenoide amarillo que hace una función de filtro frente la luz azul. El cristalino también funciona como un filtro que absorbe longitudes de onda corta.
- Diámetro pupilar: a mayor diámetro pupilar más incremento de aberración cromática.

3.2.2 Clasificación Aberración cromática

En el sistema óptico ocular se definen dos aberraciones cromáticas primarias. La primera consiste en una aberración cromática longitudinal o axial (ACL) y se define como la variación en la distancia de enfoque con longitud de onda. Seguidamente, la aberración cromática transversal (ACT) es la variación en la ampliación con la longitud de onda. (Sagrario, M., Escofet, J., Pérez, E. (2011) (Slyusarev. G. G. 2008) (Bennett and Rabbett's. 1998)

La aberración cromática longitudinal se considera más importante por causar un posible cambio de refracción en función de la longitud de onda.

Los efectos cromáticos están clasificados en dos categorías:

1. Aberración Cromática Axial o longitudinal (ACA o LCA)

Es la variación de potencia óptica del ojo según la longitud de onda. Se produce por la diferencia de tamaño obtenida para los colores de longitud de onda 400 nm y 700 nm y se manifiesta creando un contorno refulgente que disminuye la nitidez. Es una diferencia cromática de enfoque entre las longitudes de onda cortas y largas. Los rayos de luz azul, verde y rojo se enfocan en diferentes puntos del eje horizontal.

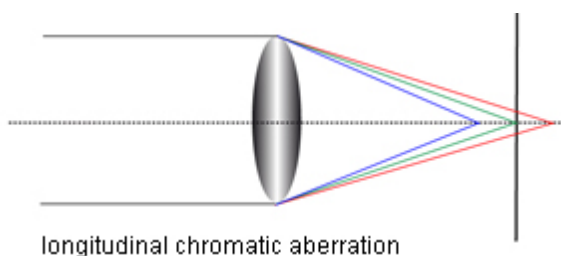


Figura 7. Aberración cromática longitudinal o axial. (<https://www.image-engineering.de> 20/04/2019)

2. Aberración Cromática de lateral o transversal (ACL o ACT)

Es el cambio de posición de la imagen en la retina creada por la distancia entre las imágenes producidas por las longitudes de onda entre 400 nm y 700 nm. En la figura observamos cómo los tres rayos de luz inciden en el mismo punto del eje horizontal, pero su posición cambia a lo largo del eje vertical.

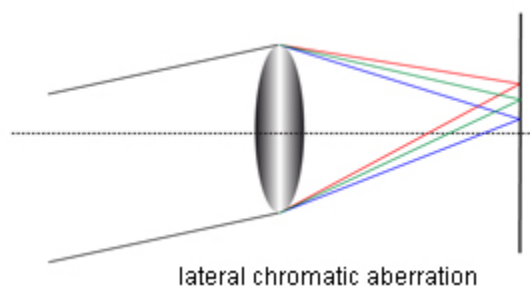


Figura 8. Aberración cromática lateral o transversal. (<https://www.image-engineering.de>, 20/04/2019)

3.2.3 Magnitud de la ACL

En el ojo humano la aberración cromática origina que los rayos de luz azul se enfoquen por delante de la luz roja. La diferencia entre ambos focos de luz es de aproximadamente 0,50/1.00 dioptrías (American Academy of Ophthalmology, 2012). (Cooper, D. P., & Pease, P. L. 1988) o incluso de 2 D. (Larry N. Thibos et al., 1992) (Howarth et al., 1988).

El valor de la ACL varía según las técnicas utilizadas en los estudios y el rango de longitudes de onda que abarquen estos.

Se ha demostrado que la acomodación puede originar más aumento en la aberración cromática longitudinal en comparación con las ametropías. En un ojo desacomodado con 0 D de acomodación la diferencia cromática de enfoque entre 400 y 700 nm es de 1.88 D, mientras que en un ojo con 10 D de acomodación el valor aumentará hasta 2.31 D. (Atchison DA, Smith G, Waterworth MD, 1993).

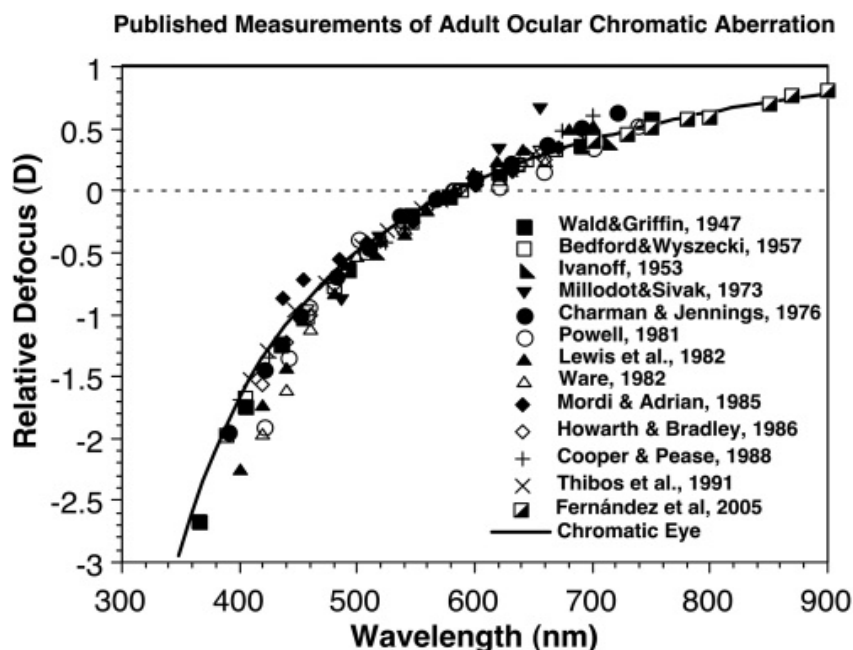


Figura 9. Comparación de diferentes estudios sobre la medición de la aberración cromática en el sistema visual de sujetos adultos. Los datos se normalizaron al desenfoque medido a 589 nm.

(Larry N. Thibos et al., 1992).

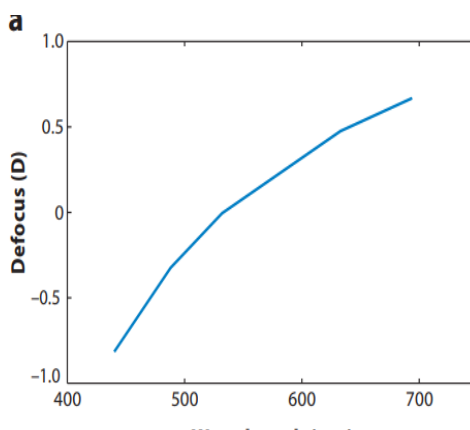


Figura 10. Esquema de la aberración cromática longitudinal, cambio de desenfoque para cada longitud de onda del espectro. (Artal P., 2015).

3.2.4 Agudeza visual cromática

La AV sobre un fondo de color puede mejorar ligeramente cuando se trata de un fondo de luz amarilla monocromática (Domenech B et al., 1994). Algunos autores sugieren que la AV con longitud de onda corta es inferior en comparación con longitudes de onda media y larga del espectro. (A. König, Sitzungsber. 1897) (W. N. Charman, J. Tucker, 1978)

En algunas investigaciones (Roaf. H. E, 1930) (G. Wald, 1967) se encontró que la AV es igual para longitudes onda rojas, verdes y blancas, mientras que disminuye con la luz azul. Concluyen que esta diferencia puede deberse a un factor fisiológico y no físico, como la existencia de menos cantidad de receptores específicos para la luz azul en la fóvea. Mientras que las longitudes de onda verde y rojo pueden estimular más receptores por unidad de área. (Roaf. H. E, 1930)

L. N. Thibos sugiere en su estudio que la magnitud de la aberración cromática lateral tiene un efecto sobre el contraste de la imagen y el conjunto de factores como la frecuencia espacial, la excentricidad del estímulo, la descentración de la pupila y la orientación del estímulo respecto al meridiano visual tienen un papel en este fenómeno. Por otra parte, el contraste de la imagen mejora considerablemente con luz verde. Además, el pigmento macular funciona como un filtro selectivo que aumenta el contraste de la imagen y la resolución foveal. (L. N. Thibos, 1987)

3.3 ACOMODACIÓN

La acomodación se define como la capacidad del cristalino para poder contraer y relajar sus músculos ciliares, lo cual provoca un cambio dióptrico en el sistema óptico y permite enfocar la imagen en distintas distancias.

3.3.1 Simulación AV en visión lejana

Para llevar a cabo la simulación de la agudez visual en visión lejana en este estudio se ha utilizado una lente positiva. Por tanto, hablaremos de cómo actúan las lentes sobre el proceso acomodativo.

La acomodación está compuesta por un rango, el cual lo forma punto más cercano que el sujeto percibe nítido llamado punto próximo (PP) y el punto más lejano que también es capaz de ver nítido, el punto remoto (PR). Por tanto, aquellos objetos que se sitúen fuera de dichos puntos están desenfocados.

La lente de potencia positiva sobre el ojo provoca un incremento de su potencia y en consecuencia relaja la acomodación, ya que, la lente produce la convergencia de los rayos de luz. Por el contrario, la lente negativa causa una disminución de la potencia del ojo y estimulan la acomodación (si el sujeto conserva una buena amplitud de acomodación) al inducir la divergencia de los rayos.

Por tanto, la lente convergente simulará la visión lejana al relajar la acomodación y formar la imagen en el infinito (PR en el infinito), ya que el ojo enfocará la imagen sobre la retina sin acomodar, condición que se da habitualmente al mirar en VL. (R. Martin, G. Vecilla, 2011.)

Cabe mencionar, que en un inicio la lente que íbamos a utilizar era de una potencia de +3,00 dioptrías, pero debido a la disminución de las habilidades acomodativas (creemos que pueda ser por un incorrecto uso de la distancia de trabajo recomendada (40 cm) en actividades de VP), nos hemos decantado por emplear una lente de +2,50 dioptrías.

Relación entre la acomodación y la aberración cromática

Se ha demostrado que la acomodación se modula en función del color que presenta el estímulo que observa el sujeto, para compensar la ACL. (W. N. Charman, J. Tucker, 1978) (E. F. Fincham, 1953). Sin embargo, algunos autores sugieren que la acomodación puede aumentar el valor de la AC. (Atchison DA, Smith G, Waterworth MD, 1993).

4. MÉTODO EXPERIMENTAL

Preparación del montaje experimental

1. Calibrar la luminancia de los LED.
2. Montar los LED de forma óptima.
3. Controlar la distancia de presentación de los test y la iluminación que incide sobre ellos.
4. Realizar una prueba piloto con 2 participantes.

Contrabalanceo

Con el fin de evitar métodos de aprendizaje y asegurar que los resultados sean fiables, se realiza el método de contrabalanceo en el cual el orden de la prueba es aleatorio. Las luces LED se presentan de forma aleatoria por cada paciente. Así mismo, se va alternando el comienzo de la prueba, es decir, algunos/as empiezan haciendo la prueba en VL y otros en VP.

4.1 Muestra de pacientes

Entre los 10 sujetos seleccionados para el proyecto todos deben cumplir los siguientes criterios de inclusión:

- 5 hombres y 5 mujeres
- Los sujetos deben tener una edad comprendida entre los 9 y 16 años.
- Deben llegar a una agudeza visual de la unidad ($AV=1,00$), con la mejor corrección.
- No deben presentar ninguna disfunción de la visión binocular.

Con el objetivo de que se cumplan los criterios citados, previamente se realiza la medida de la AV en VL con un optotipo de C Landolt a 3 metros y se comprueba cual es el ojo con mejor agudeza visual.

4.2 Material

Entre el material utilizado encontramos:

- 4 tipos de iluminaciones: LED verde (530 nm), LED azul (455nm), LED Blanco (6500 kh) y LED rojo (625 nm).
- Banco óptico y soportes.
- Lente positiva de +2,50 D, la cual simulará la visión lejana.
- Optotipo especial creado para este proyecto: C Landolt.

Previamente, las luces LED deben ser calibradas y se debe crear el optotipo que se usará en la parte experimental.

4.2.1 Calibración de las luces LED

Se lleva a cabo la calibración de las 4 luces LED con el objetivo de que aporten una luminancia idéntica en la misma distancia de trabajo. El criterio de calibración se basa en cuál es el LED menos potente, es decir, el más “oscuro” a pesar de ponerlo con la máxima intensidad posible y, a partir de este valor se ajustan las otras luces.

Mediante el uso de un fotómetro o luxómetro (Mavolux 5032B) se mide el valor de luminancia que producen las 4 luces y encontramos que el LED azul es el menos potente ya que su luminancia máxima es de 16 cd/m². Así pues, se calibran todos los LEDs con el valor de luminancia del LED azul y se consigue que el color sí sea un factor que influya en las medidas y no la intensidad de las luces.



Figura 11. Los 4 tipos de luces LED.

Como observamos en las fotos de la figura 11 (en orden, LED blanco, rojo, azul y verde), cada LED está marcado con una señal diferente pero a la vez todos tienen el mismo valor de luminancia. El LED azul está al límite.

4.2.2 Espectro de las luces LED

En este apartado se mostrará las gráficas correspondientes de cada LED, en las cuales se representa la longitud de onda de cada iluminación en el espectro visible.

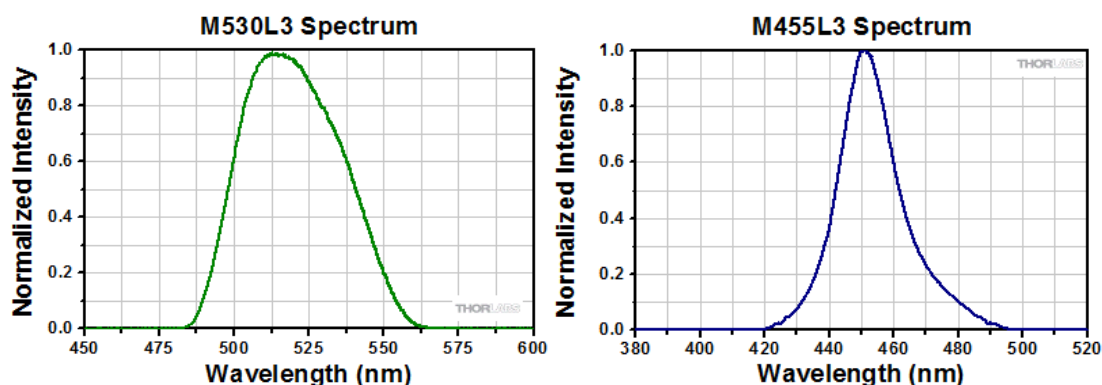


Figura 12. Rango de longitud de onda de 530 nm para el LED Verde y 455 nm para el LED Azul.

(<https://www.thorlabs.com/> 31/05/2019)

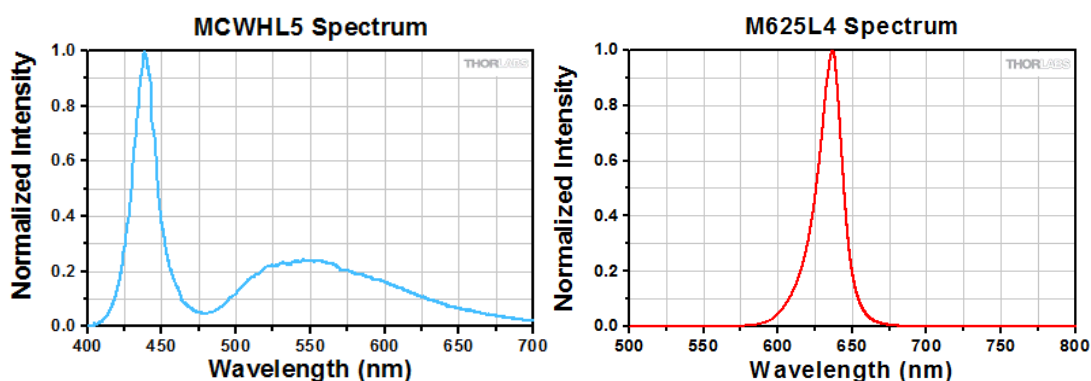


Figura 13. Rango de longitud de onda de 6500 Kh para el LED blanco y 625 nm para el LED rojo.

(<https://www.thorlabs.com/> 31/05/2019)

4.2.3 Técnica de impresión del Optotipo

El optotipo utilizado en este trabajo ha sido creado siguiendo la normativa vigente de optotipos (ISO 8596:2017), a través del programa PowerPoint y con una tipografía llamada C de Landolt. Se selecciona una escala logarítmica (log MAR) para crear el test.

El optotipo utilizado en la prueba tiene unas dimensiones realmente pequeñas, es por este motivo que la impresión debe ser de la máxima calidad posible para que se puedan discernir correctamente las últimas líneas del test y que por tanto la prueba sea fiable.

Al imprimir el texto este debe reducirse un 25% y, posteriormente, un 40% adicional para obtener el tamaño deseado.

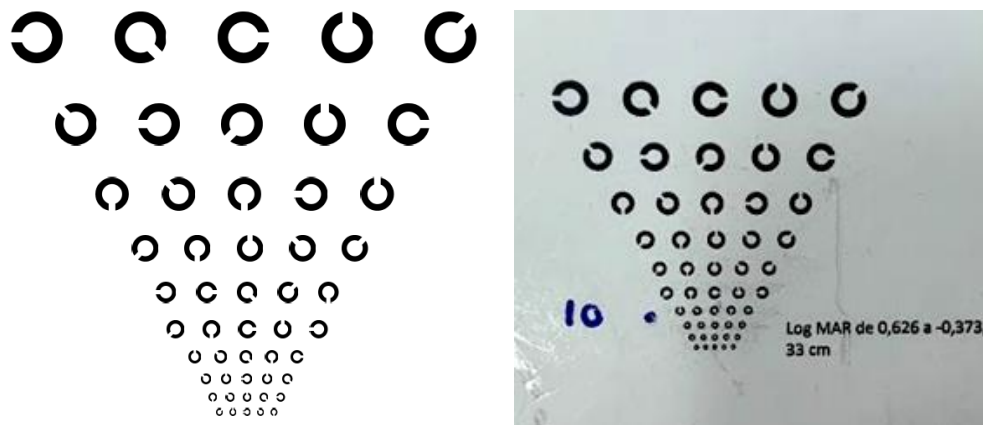


Figura 14. En la derecha el optotipo de C de Landolt creado y a la izquierda el optotipo que se utiliza para realizar las pruebas una vez imprimido.

Acudimos a empresas especializadas en artes gráficas y explicamos cómo queremos que sea el resultado final del optotipo. Por ello, también pedimos que nos aconsejen sobre qué tipo de material sería el más idóneo para imprimir el test y que seleccionen el mejor tipo de impresión. A pesar de explicar las indicaciones no obtenemos buenos resultados. Por ejemplo, la reducción que deseábamos realizar no la consiguen y el tipo de papel que utilizan es el de fotografía convencional e incluso con un tamaño superior del test no se distinguen bien las últimas filas de este.

El optotipo que vemos en la figura 14, a la izquierda, es el que se ha obtenido con mejor calidad y el que finalmente se utilizará.

4.3 Procedimiento

El experimento se lleva a cabo en un banco óptico y su duración es de aproximadamente 20 minutos. El procedimiento consiste en medir la agudeza visual con un optotipo de C de Landolt bajo diferentes tipos de luz LED (blanco, azul, verde, rojo) en VP y en VL (simulada con una lente de +2,50 D).

La medida se tomará en el ojo con mejor AV en ambos casos. En total obtenemos 8 medidas por paciente.



Figura 15. Ejemplo de cómo se realiza la toma de medidas para VL (con 1 ojo ocluido y 1 ojo con la lente de +2,5 D) con dos iluminaciones.

Medida de la AV en Visión próxima:

1. Se coloca el optotipo a una distancia de 34 cm del paciente.
2. El sujeto apoya barbilla y frente en la mentonera.
3. Se ocluye el ojo con peor AV.
4. La sala se deja a oscuras.
5. En orden aleatorio se incide sobre el optotipo los diferentes tipos de LED.
6. Se mide la AV bajo las diferentes iluminaciones.

Medida de la AV en Visión lejana:

1. Se coloca el optotipo a una distancia de 33 cm del paciente.
2. Se ocluye el ojo con peor AV.
3. En gafa de prueba se coloca una lente de +2,50 D para relajar la acomodación y simular visión lejana.
4. El sujeto apoya barbilla y frente en la mentonera.
5. La sala se deja a oscuras.
6. En orden se incide sobre el optotipo los diferentes tipos de LED.
7. Se mide la AV bajo las diferentes iluminaciones.

5. RESULTADOS

El procedimiento se ha realizado alternando el orden de presentación de las luces LED y la distancia de trabajo (lejos-cerca). Previamente, se mide la agudeza visual con un optotipo de C de Landolt con progresión logarítmica diseñado a 3 metros. En total obtenemos 8 resultados por observador.

Al simular la visión lejana con la lente positiva de +2,50 dioptrías, dejamos que los pacientes estén con la lente un momento antes de empezar la prueba, ya que la primera impresión es visión borrosa la cual disminuye al cabo de un rato.

	Observador	OD/OI	AV en VL	Corrección óptica	
Niñas	1	12 a	OD	1.59	No
	2	12 a	OD	1.26	No
	3	9 a	OI	1.59	No
	4	12 a	OD	1.59	No
	5	12 a	OI	1.59	No
Niños	6	11 a	OD	1.59	No
	7	11 a	OD	1.59	No
	8	11 a	OI	1.26	No
	9	16 a	OI	1.59	No
	10	10 a	OD	1.26	No

Tabla 1. Datos a tener en cuenta para realizar la toma de medidas.

Como vemos en la tabla 1 todos los sujetos no utilizan corrección óptica y el valor de su agudeza visual es buena. Los observadores se dividen en 2 grupos, 5 niñas y 5 niños. En cuanto a la selección del ojo que realiza la prueba dejamos que el observador lo elija.

Para crear las gráficas que veremos a continuación, hemos realizado un promedio de las agudezas visuales que obtiene cada LED. También se realizará la medida de la desviación estándar para cuantificar la variación o dispersión de los datos que obtenemos.

Se crearán 4 gráficas con la media de la AV para cada color, las dos primeras serán con los resultados de AV de toda la muestra de pacientes obtenidos en visión próxima y visión lejana y, finalmente las dos últimas se crearán a partir del género de los observadores para VL y VP. El fin de crear las últimas gráficas será para corroborar si el fenómeno de la aberración cromática afecta más en niños o bien en niñas.

5.1 Resultados de AV cromática en VP

Agudeza visual en visión próxima						
Observador			LED			
			Blanco	Azul	Verde	Rojo
Niñas	1	12 años	1.4	1.1	1.3	1.3
	2	12 años	1.2	1.1	1.2	1.3
	3	9 años	1.4	1.2	1.4	1.3
	4	12 años	1.2	1.1	1.2	1.2
	5	12 años	1.2	1.3	1.4	1.2
Niños	6	11 años	1.3	1.1	1.3	1.2
	7	11 años	1.2	1.1	1.2	1.2
	8	11 años	1.3	1.1	1.3	1.2
	9	16 años	1.3	1.1	1.3	1.2
	10	11 años	1.2	1.1	1.2	1.1

Tabla 2. Resultados de la medida de la AV en VP con diferentes iluminaciones.

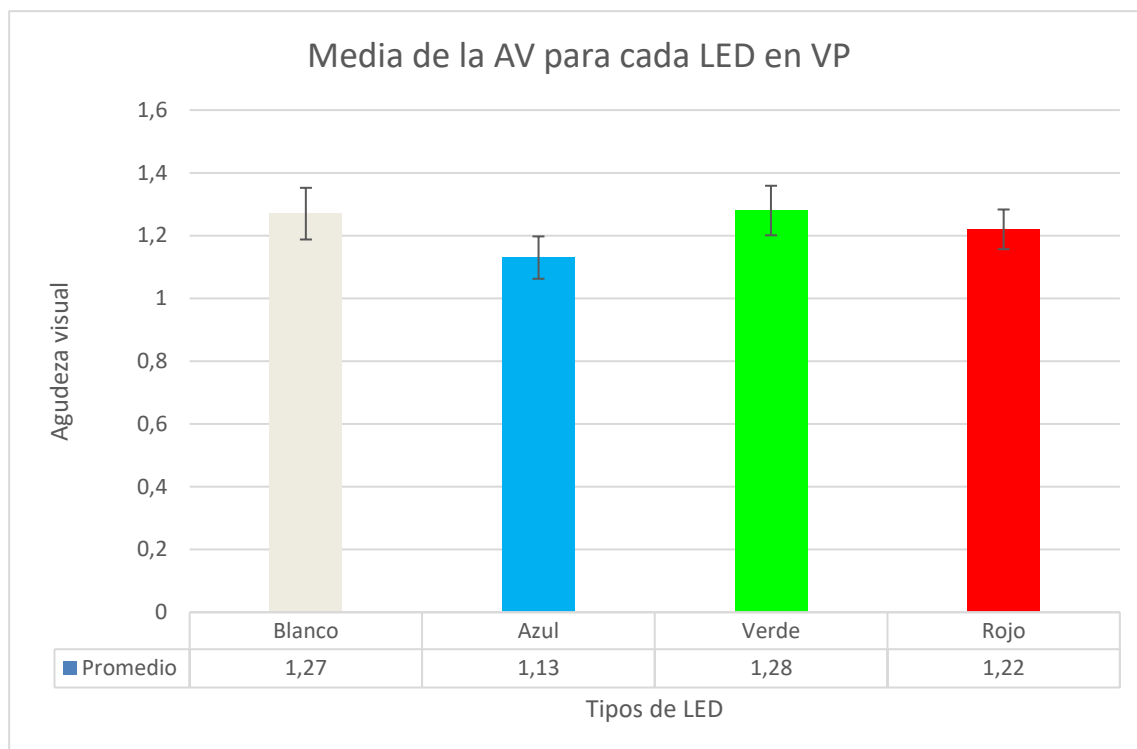
En la tabla 2 observamos que los valores obtenidos para la iluminación azul son considerablemente inferiores en la mayoría de los casos. Comparando los valores de AV para las luces blanca, verde y rojo los resultados son bastante similares.

Subjetivamente, los individuos refieren mejor visión y comodidad con las luces LED de color blanco y verde. En general, notan más dificultad con la luz LED Azul, seguido de la luz roja, verde y finalmente la blanca.

	LED Blanco	LED Azul	LED Verde	LED Rojo
Promedio de las AV	1,27	1,13	1,28	1,22
Desviación estándar	0,0823	0,0674	0,0788	0,0632

Tabla 3. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VP.

El valor promedio de la agudeza visual para cada iluminación se asemeja en el caso de los LED blanco y verde, con una diferencia de 0,01 (Tabla 3). Además, el LED rojo obtiene una media de AV más similar a las logradas por el blanco y el verde. Finalmente, el promedio del LED azul es considerablemente inferior en comparación con las otras 3 luces. Respecto la medida de la desviación estándar comprobamos que los datos no están dispersos respecto la media.



Gráfica 1. Media de la AV para cada iluminación en visión próxima.

La gráfica 1 nos muestra el promedio de la agudeza visual para cada LED. Las barras de error se han creado a partir de los valores de la desviación estándar. Por ejemplo, el LED blanco obtiene una media de 1,27 de AV y con una desviación estándar de $\pm 0,08232726$, lo cual nos indica que la mayoría de la muestra de pacientes tienen una AV cercana al valor de la media. Asimismo, sucede el mismo proceso en el resto de los casos. La iluminación que obtiene un mejor promedio de agudeza visual es el LED verde y a continuación por orden de mejor a peor, el LED blanco, LED rojo y LED azul.

5.2 Resultados de AV cromática en VL

Agudeza visual en visión lejana						
Observador			LED			
			Blanco	Azul	Verde	Rojo
Niñas	1	12 años	1.4	1.0	1.3	1.3
	2	12 años	1.0	0.8	1.1	1.1
	3	9 años	1.3	1.0	1.2	1.2
	4	12 años	1.3	1.0	1.3	1.2
	5	12 años	1.4	1.2	1.4	1.2
Niños	6	11 años	1.3	1.1	1.2	1.2
	7	11 años	1.3	1.0	1.2	1.0
	8	11 años	1.2	0.9	1.2	1.2
	9	16 años	1.2	0.8	1.1	1.2
	10	11 años	1.2	0.8	1.3	1.1

Tabla 4. Resultados de la medida de la AV en VL con diferentes iluminaciones.

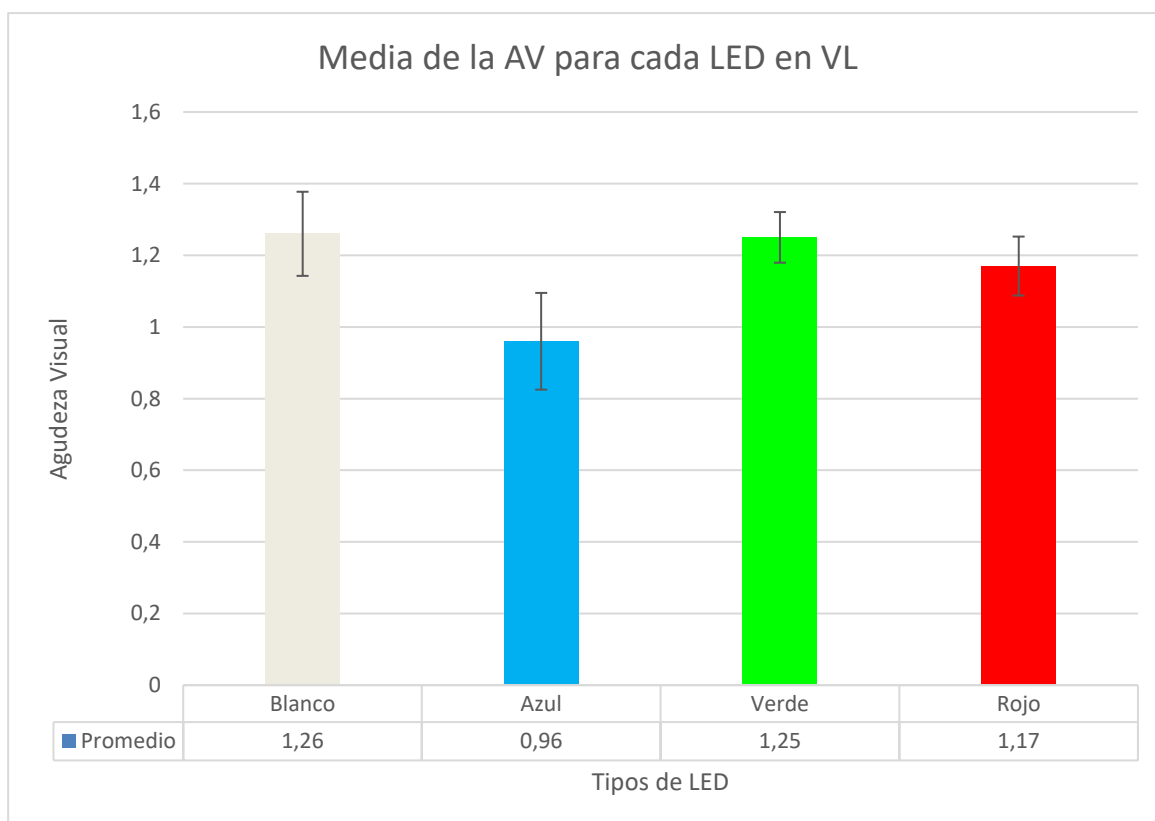
En la tabla 4 vemos que los resultados obtenidos para la AV con el LED azul decae más respecto los resultados en VP. Además, los sujetos refieren más dificultad en este caso.

Consideramos el problema de añadir la lente de +2,50 para simular la VL y es por esto que antes de empezar la prueba dejamos que puedan adaptarse, ya que al principio comentan ver todo borroso y ser incapaces de enfocar. Igual que en VP los valores de AV para blanco, verde y rojo son similares, aunque las máximas agudezas son en primer lugar el blanco y en segundo puesto el verde.

	LED Blanco	LED Azul	LED Verde	LED Rojo
Promedio de las AV	1,26	0,96	1,25	1,17
Desviación estándar	0,1173	0,1349	0,0707	0,0823

Tabla 5. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VL.

En la tabla 5 observamos que una vez más el promedio de AV para la luz blanca y la verde son similares. En VL las diferencias entre ambas iluminaciones es prácticamente nula, ya que la diferencia es de 0,01, siendo superior la AV con el LED blanco. Para el LED rojo el promedio de la agudeza decae un poco en comparación con el valor en VP. En cuanto al LED azul es el que obtiene el resultado más bajo, con una media de 0,96 de AV.



Gráfica 2 . Media de la AV para cada iluminación en visión lejana.

Los resultados en visión lejana de la media de la AV para cada LED aparecen en la gráfica 2 y son análogos a la gráfica 1. De igual manera que en visión próxima, las barras de error también las hemos creado a partir de los datos de la desviación estándar (σ) y en esta ocasión los valores aumentan para el LED blanco y el azul, siendo $\pm 0,11737878$ y $\pm 0,13498971$, respectivamente. Este aumento nos podría indicar más dispersión o variación de la AV entre observadores, es decir, que estén más alejados de la media de la agudeza visual para ese color. Por el contrario, los valores de la σ son pequeños para la iluminación verde y rojo, lo cual indica poca variación entre valores de AV.

5.3 Resultados de AV cromática según el género

Las gráficas que veremos en este apartado se han realizado igual que las anteriores con la única diferencia que separamos a los observadores según su género. Como comentamos anteriormente, el fin de crear estas gráficas será para corroborar si la aberración cromática afecta más en niños o niñas, o bien son iguales.

A continuación, veremos 2 gráficas clasificadas en niños/as y en las dos distancias que se realiza la prueba (lejos-cerca). También hemos creado las tablas con los valores del promedio y la desviación estándar.

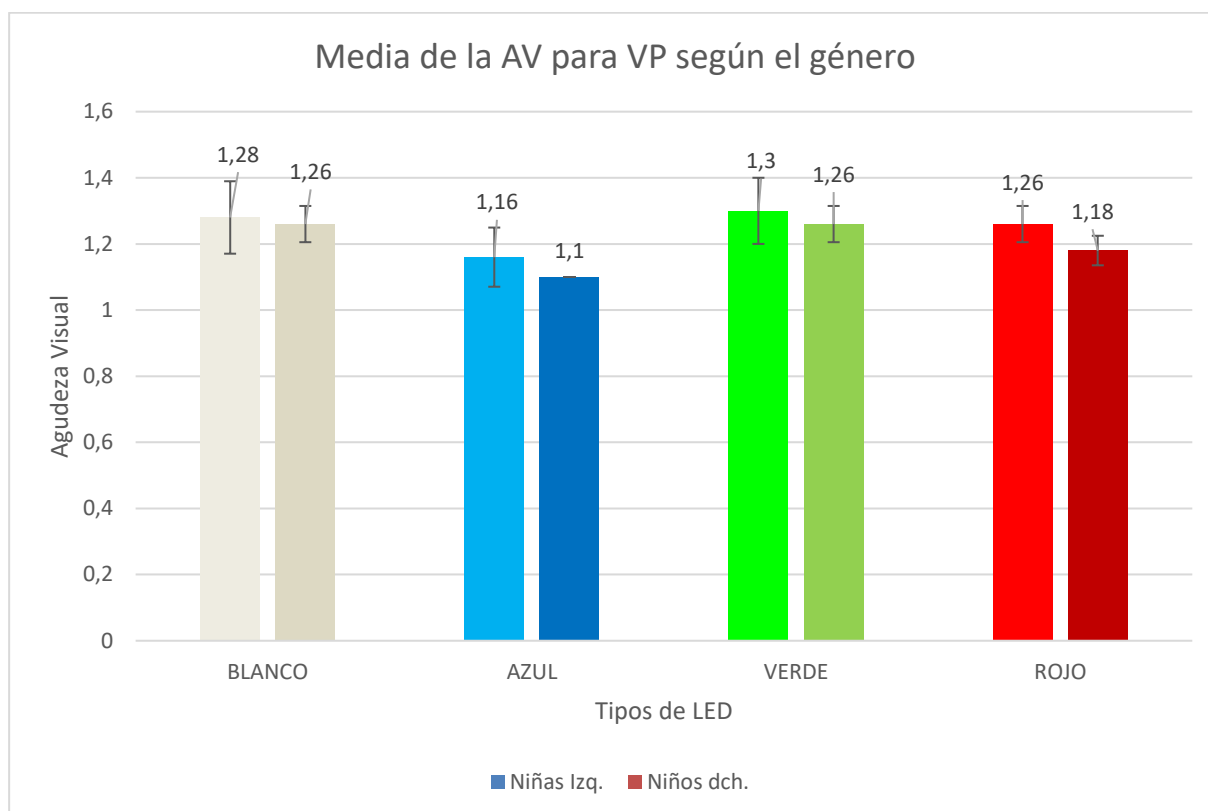
➤ Promedio AV cromática en VP para niñas y niños

Niñas	Blanco	Azul	Verde	Rojo
Promedio	1,28	1,16	1,3	1,26
Desviación estándar	0,1095	0,0894	0,1	0,0547

Tabla 6. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VP en niñas.

Niños	Blanco	Azul	Verde	Rojo
Promedio	1,26	1,1	1,26	1,18
Desviación estándar	0,0547	0,00	0,0547	0,0447

Tabla 7. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VP en niños.



Gráfica 3. Media de la AV en VP para cada iluminación según el género de la muestra de pacientes.

La gráfica 3 nos muestra las diferencias entre la media de la AV realizadas en visión cercana. En esta ocasión hemos separado a los observadores por el género, las barras situadas a la izquierda de la gráfica corresponden a los resultados que obtienen las niñas y a la derecha los resultados de los niños. A primer vista, determinamos que las niñas logran mejores resultados de agudeza visual en comparación con los niños. Las diferencias entre promedios de AV entre niñas y niños son las siguientes:

VP	BLANCO	AZUL	VERDE	ROJO
Diferencia de AV	0,02	0,06	0,04	0,08

A pesar de que la diferencia entre AV según el grupo sea relativamente baja, las chicas tienen mejores agudezas en todas las iluminaciones.

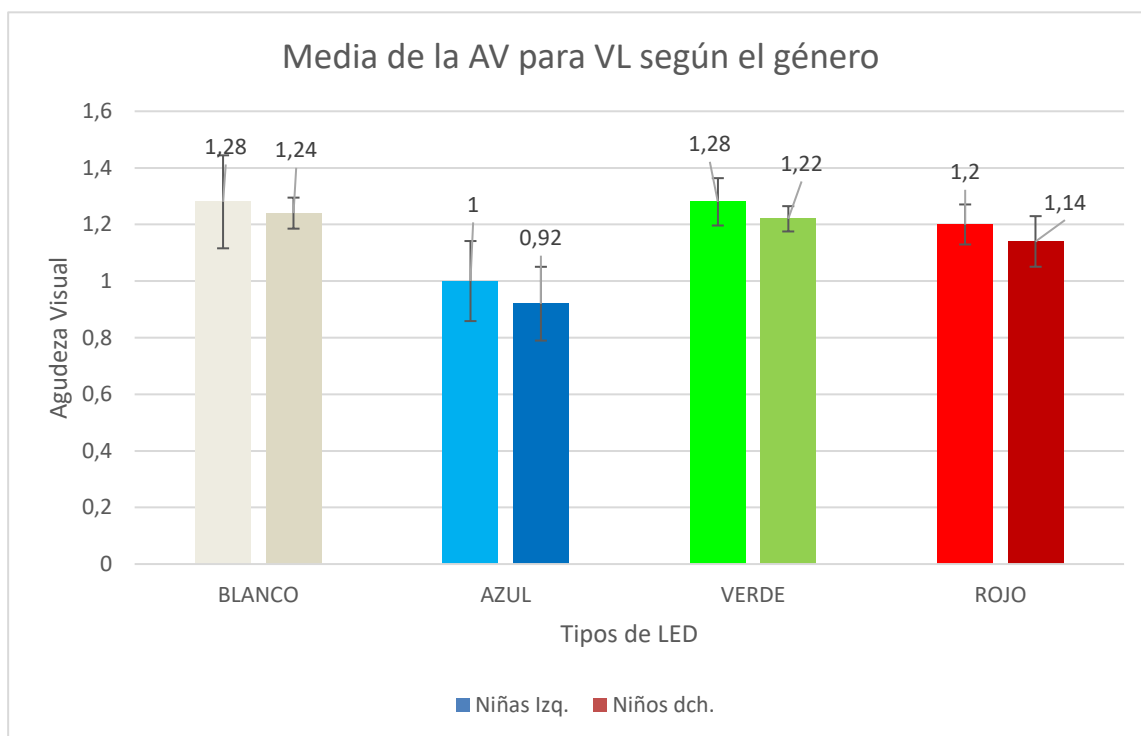
➤ **Promedio AV cromática en VL**

Niñas	Blanco	Azul	Verde	Rojo
Promedio	1,28	1,00	1,28	1,2
Desviación estándar	0,1643	0,1414	0,08366	0,0707

Tabla x. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VL en niñas.

Niños	Blanco	Azul	Verde	Rojo
Promedio	1,24	0,92	1,22	1,14
Desviación estándar	0,0547	0,1303	0,0447	0,089

Tabla x. Valores del promedio de las AV para cada LED y su respectiva desviación estándar para VP en niños.



Gráfica 4. Media de la AV en VL para cada iluminación según el género de la muestra de pacientes.

En visión lejana también hay diferencias entre agudezas visuales, siendo superiores, otra vez, en el grupo de niñas. Del mismo modo que en VP, la desigualdad en VL entre géneros es pequeña y es la siguiente:

VL	BLANCO	AZUL	VERDE	ROJO
Diferencia de AV	0,04	0,08	0,06	0,06

6. CONCLUSIONES

Considerando los valores de la Tabla 1, todos los observadores tienen buenos valores de agudeza visual y además ninguno necesita/utiliza corrección óptica, por lo tanto consideramos que sus ojos son emétopes.

Según el estudio realizado por Jingyun Wang et al. (Jingyun Wang et al., 2008) en un ojo emétrope las longitudes de onda media, es decir, las luces verdes-amarillas se enfocan sobre la retina. Por ello, creemos que la mayoría de pacientes que han participado en este estudio obtienen los mejores resultados de AV con los LED verde y blanco.

El ojo emétrope se transformará en miope cuando la luz incidente sea azul y actuará como hipermetrope cuando la luz sea roja. En los datos que obtenemos la agudeza visual con la luz roja es similar a la obtenida por la luz verde y blanca, ya que, como se ha comentado la luz roja simula una hipermetropía sobre el ojo emétrope y esta "falta" de potencia la puede compensar la acomodación y, por tanto, no se verán tan comprometidas las AV con esta tonalidad.

Por último, la luz azul al producir una miopía y crea ese efecto de exceso de potencia (los rayos azules se refractan más y recaen antes de la retina) no podrá ser compensado por el sistema visual y provocará una disminución de la agudeza visual.

Llegamos a la conclusión que la luz blanca y verde proporcionan mejor visión y la luz roja y azul empeoran las AV (sobre todo la luz azul), siempre y cuando se trate de un ojo emétrope o bien con alguna ametropía pero con su corrección pertinente.

Nuestros resultados concuerdan con los estudios científicos consultados, la mayoría de autores concluyen que la AV sobre un fondo blanco/ amarillo/ verde es superior en comparación con la luz azul y roja. (Domenech B et al., 1994) (L. N. Thibos, 1987) (A. König, Sitzungsber. 1897) (W. N. Charman, J.Tucker, 1978) (Roaf. H. E, 1930)

Teniendo en cuenta los objetivos generales del trabajo llegamos a la conclusión de que la aberración cromática sí repercute sobre el sistema visual. Con relación a los resultados obtenidos en visión lejana observamos que las agudezas visuales disminuyen ligeramente en esta distancia. Creemos que puede ser debido al uso de la lente positiva de 2,50 D, la cual simula la visión lejana. Como comentamos anteriormente en general los observadores mencionaban visión borrosa cuando utilizaban la lente positiva, por este motivo dejamos que pudieran adaptarse a ella y poder relajar la acomodación antes de realizar la prueba. A pesar de dejar el tiempo de adaptación con la lente suponemos que esta diferencia de agudezas en VL y VP pueda ser causado por una disminución de las habilidades acomodativas de los observadores.

Respecto los objetivos específicos, uno de nuestros objetivos era averiguar el mejor método para imprimir el optotipo. En las tablas de resultados la mejor AV es de 1.4 (penúltima línea) y menos de la mitad de los pacientes son capaces de conseguirla. A partir de la cuarta línea, correspondiente a la AV de 1.2, la mayoría de observadores comentan ver solo redondas. Este inconveniente podría ser debido a la calidad de impresión del optotipo y consecuentemente desfavorecer los resultados finales.

En cuanto a las diferencias entre el género de la muestra de pacientes concluimos que sí hay desigualdad entre los resultados de las AV. Cabe mencionar que las diferencias entre promedios de AV no son muy significativas pero sí existen. Tanto para visión cercana como para visión lejana el grupo de niñas logran obtener mejor rendimiento visual con todas las luces.

7. REFERENCIAS

Artículos

- Artal, P. (2015). Image formation in the living human eye. *Annual Review of Vision Science*, 1, 1-17.
- Atchison, D. A., Smith, G., & Waterworth, M. D. (1993). Theoretical effect of refractive error and accommodation on longitudinal chromatic aberration of the human eye. *Optometry and Vision Science : Official Publication of the American Academy of Optometry*, 70(9), 716-722.
- Charman, W. N., & Jennings, J. A. (1976). Objective measurements of the longitudinal chromatic aberration of the human eye. *Vision Research*, 16(9), 999-1005.
- Charman, W. N. & Tucker, J. (1978). Accommodation and color. *Journal of the Optical Society of America*, 68. 459-471
- Cooper, D. P., & Pease, P. L. (1988). Longitudinal chromatic aberration of the human eye and wavelength in focus. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 65(2), 99-107.
- Domenech, B., Seguí, M.M., Capilla, P., & Illueca, C. (1994). Variation of the visual acuity-luminance function with background colour. *Ophthalmic & Physiological Optics : The Journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 14(3), 302-305
- Fincham, E. F. (1953). Defects of the colour-sense mechanism as indicated by the accommodation reflex. *The Journal of Physiology*, 121(3), 570-580.
- Howarth, P. A., Zhang, X. X., Bradley, A., Still, D. L., & Thibos, L. N. (1988). Does the chromatic aberration of the eye vary with age? *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and Image Science*, 5(12), 2087-2092.
- Konig, A., Sitzungsber. d. Berl. Akad. Wiss. p. 559. (1897)
- Roaf, H. E. (1930). Visual acuity in light of different colours. *Proc. R. Soc. London Ser. B* 106, 276–292
- Thibos, L. N., Ye, M., Zhang, X., & Bradley, A. (1992). The chromatic eye: A new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans. *Applied Optics*, 31(19), 3594-3600.
- Thibos, L. N. (1987). Calculation of the influence of lateral chromatic aberration on image quality across the visual field. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics and Image Science*, 4(8), 1673-1680.
- Wang, J., Candy, T. R., Teel, D. F. W., & Jacobs, R. J. (2008). Longitudinal chromatic aberration of the human infant eye. *Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision*, 25(9), 2263-2270.

- WALD, G., & GRIFFIN, D. R. (1947). The change in refractive power of the human eye in dim and bright light. *Journal of the Optical Society of America*, 37(5), 321-336.

Libros

- American Academy of Ophthalmology (AAO) (2012). *Óptica clínica*. Sección 3. Cap 2. (102-103). Elsevier.
- Artigas J.M. , Capilla P., Felipe A. y Pujol J. (1995). *Óptica Fisiológica: Psicofísica de la Visión*. Madrid: McGraw-Hill Interamericana.
- Bennett and Rabbett's. (1998). *Clinical Visual Optics*. Chapter 15. Ocular Aberrations. Oxford, Boston: Butterworth-Heinemann.
- Borràs, M.R, Castañé, M., Ondategui, J., Pacheco, M., Peris, E., Sánchez, E., & Varón, C. (1999). *Optometría: Manual de exámenes clínicos* (3rd ed.). Barcelona: EDICIONES UPC.
- Martín, R., & Vecilla, G. (2011). *Manual de optometría*. Madrid: Editorial Médica Panamericana.
- Pedrotti L, Pedrotti F. (1998). *Optics and vision*. Cap 7: Aberration Theory, 134 -141. Englewood Cliffs (New Jersey): Prentice-Hall.
- Puell Marín, M.C.,. (2014). *Óptica Fisiológica: El sistema óptico del ojo y la visión binocular*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Sagrario, M., Escofet, J., Pérez, E. (2011). *Óptica Geométrica* (2ª ed). Barcelona: Ariel Ciencia.
- Slyusarev. G. G. (2008). *Aberration and Optical Design Theory*. California: Ediciones universidad de California.
-

Otras referencias

- Adelina Felipe Marcet. *Óptica Fisiológica. Apuntes Tema III: La calidad de la imagen: agudeza visual*.
- Apuntes de la materia *Psicofísica y Neurofisiología de la visión*. Parámetros y Atributos del color. Universidad Politécnica de Cataluña
- Óptica oftálmica. Ensayo de la agudeza visual. Optotipos normalizados y clínicos y su presentación. (ISO 8596:2017). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma/?c=N0061288>, 05/05/2019

8. ANEXOS

Anexo 1

Consentimiento Informado

- Nombre del proyecto: Comparación de la agudeza visual en visión de cerca y visión de lejos bajo diferentes iluminaciones en una muestra de población infantil.
- Procedimientos y maniobras: El procedimiento consiste en medir la agudeza visual en visión lejana y visión próxima en un banco óptico bajo 4 tipos de luz led (Azul, Verde, Roja y Blanca). Se realizarán 8 medidas totales en el ojo con mejor visión.
- Tiempo de procedimiento: 20 minutos aproximadamente.
- Lugar: Se realizará en un laboratorio de la facultad de Óptica y Optometría.
- Riesgos e inconvenientes: La prueba no es invasiva ni dolorosa.
- Confidencialidad y manejo de la información: se garantiza que sus datos no podrán ser vistos o utilizados por otras personas ajenas al estudio ni tampoco para propósitos diferentes.
- Beneficios: Usted no recibirá ningún beneficio médico o económico por la participación en este proyecto.
- La estudiante de cuarto curso Katty López Abad realizará el procedimiento descrito anteriormente con la finalidad de utilizar los datos en su trabajo de final de carrera. Por ello, se solicita su permiso como tutor/a del menor.
- Yo _____ con DNI _____ y como tutor/a de _____ autorizo que los datos sean utilizados con fines académicos.
- En _____, a ____ día de _____ del año 2019

Firma del tutor/a:

Firma del investigador/a:

