



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Superficies de igual agudeza visual representadas
en el espacio de potencias dióptricas

Autor/es

Pedro M^a Navarro Sangüesa

Director/es

Laura Remón Martín

M^a Concepción Marcellán Vidosá

Óptica y optometría

2016

ÍNDICE

1. Introducción	pág. 2
2. Objetivos	pág. 3
3. Metodología	
a. Sujetos.....	pág. 4
b. Aparatos utilizados.....	pág. 4
c. Procedimiento de las medidas.....	pág. 6
d. Análisis de datos.....	pág. 8
4. Resultados.....	pág. 11
5. Discusión	pág. 20
6. Conclusiones	pág. 22
7. Bibliografía	pág. 23

1. Introducción

La relación entre la ametropía y la agudeza visual (AV) ha sido de interés durante el siglo que nos precede y sigue siendo un campo a explorar en la actualidad por sus aplicaciones directas en las áreas de investigación básica y por su utilidad en la clínica optométrica.

La agudeza visual nos da mucha información del sistema visual y es el primer parámetro subjetivo con el que se mide el éxito de una intervención quirúrgica. Depende de muchos factores, internos y externos. Los factores internos o propios de cada individuo pueden ser fisiológicos, como la dependencia con el tamaño de nuestras células retinianas [1, 2], la edad [3, 4], las aberraciones de alto orden [5], la profundidad de foco [6], la propia ametropía, que produce desenfoque esférico y cilíndrico, la acomodación, la dispersión de la luz dentro del ojo [7] o el tamaño pupilar [8]; o de carácter psicológico [9]. Y factores externos que hemos de controlar en la medida de esta como: la iluminación ambiental y del test, la distancia hasta los optotipos, el contraste y el tipo de optotipo.

Por todo esto, encontrar la relación cuantitativa entre ametropía y agudeza visual parece complicado. En un estudio clínico clásico realizado por Peters [10] el autor realiza una representación gráfica donde relaciona la AV alcanzada para diferentes astigmatismos con las AV correspondientes a ametropías esféricas. Sin embargo, no tiene en cuenta ni la orientación de los ejes de los astigmatismos ni la influencia de la acomodación. Tampoco es fácil predecir teóricamente cuál será el efecto sobre la AV de una cierta ametropía que tenga componente cilíndrico.

En los últimos años se ha propuesto una representación alternativa de la refracción ocular que en lugar de utilizar los tres parámetros clásicos: Esfera, Cilindro y Eje, ($E; C \times \alpha$), utiliza un vector definido en el denominado “espacio de potencias dióptricas” [11, 12]. Utilizando esta nueva notación, que ha demostrado su utilidad en numerosas aplicaciones [13, 14], Raasch [15] ha propuesto un modelo teórico en el que la AV estaría relacionada simplemente con el módulo del mencionado vector. Los componentes de este espacio de potencia forman una base entre sí, es decir, son linealmente independientes. De este modo, la AV sólo dependería de la magnitud del astigmatismo y del equivalente esférico pero no de la orientación del eje, y como consecuencia podremos operar con ellos de una forma más efectiva. Además, evitamos trabajar con múltiples notaciones para una misma refracción y problemas en las distribuciones estadísticas.

Un estudio realizado por Harris y colaboradores [11] con 5 sujetos a los que se les simulaban ametropías esféricas y astigmatismos mixtos simétricos (con el círculo de mínima confusión en la retina), sugiere que en la medida en que la acomodación esté activa no es posible cuantificar el efecto neto del astigmatismo sobre la AV [16, 17].

Estudios previos ya han simulado el efecto del desenfoque en la agudeza visual [18, 19], llegando a proponerse una relación cuantitativa entre ametropía y agudeza visual [20, 21]. En un estudio publicado por Remón y col. [18] simularon astigmatismos miópicos simples y miopías en 4 ojos sanos, debidamente compensados para el estudio de la variación de la AV. Comprobando de manera experimental que la AV inducida puede cuantificarse con el módulo del vector B.

Por otra parte, existe una relación lineal entre el astigmatismo corneal y el astigmatismo refractivo [22]. El primero en postularla fue Javal [23] en 1890, quien propuso que cuando el astigmatismo corneal era recto, a favor o en contra de la regla, el astigmatismo refractivo podía ser calculado multiplicando el corneal por 1.25 y añadiendo la constante (-0.50 D X 90), que se asocia al astigmatismo interno del ojo. Posteriormente esta regla fue afinada por Grosvenor y col. [24, 25] y confirmada por otros autores [19]. El resultado de una investigación de Keller a este respecto [26] dio fruto a la regla de Javal simplificada. Sin embargo, todas estas reglas no tienen en cuenta el astigmatismo oblicuo.

Más recientemente se propuso por Tong y col. [27] una versión que sí los incluía, a partir de un modelo de la regla de Javal que usaba el vector de potencia o B en sus cálculos.

Por último, la relación entre la refracción objetiva proporcionada por un autorrefractómetro y la refracción subjetiva, es también un tema que a todos los optometristas nos ocupa y que también trataremos de evaluar en este trabajo. Existen distintas técnicas para establecer la compensación óptica necesaria del error refractivo. Por norma general, se realiza una refracción objetiva, mediante autorrefractómetro o retinoscopio, y después una refracción subjetiva en la cual se busca el mejor valor de agudeza visual. Es considerado como mejor método aquel con el que obtenemos este objetivo.

2. Objetivos

Los objetivos de este Trabajo Fin de Grado son los que se describen a continuación.

- 1) Relacionar el error refractivo del paciente, expresado mediante el módulo del vector B, con la AV que éste alcanza. Estos datos se representarán en superficies de igual AV, es decir, qué módulos de B alcanzan el mismo valor de AV.
- 2) Estudiar modelos matemáticos que relacionen la AV con el error refractivo.
- 3) Relacionar y comparar la refracción que se obtiene mediante la refracción subjetiva con la que se obtiene a partir de un autorrefractómetro.
- 4) Relacionar el astigmatismo queratométrico proporcionado por el autorrefractómetro con el de la refracción subjetiva (astigmatismo total) para comprobar la regla de Javal.

3. Metodología

a. Sujetos

Se midió la AV en 340 ojos sin corrección en 170 pacientes comprendidos en un rango de entre 10 y 80 años siendo la media de edad (43.17 ± 16.09) años, de los cuales 89 sujetos eran hombres y 81 mujeres. Los sujetos con enfermedades sistémicas u oculares y que hubieran sido sometidos a cirugía ocular fueron excluidos de este estudio. Además se realizó la prueba de flexibilidad acomodativa monocular para descartar posibles problemas acomodativos. También fueron excluidos aquellos pacientes con una agudeza visual decimal inferior a 0.8 con su mejor corrección.

Todos los datos del estudio fueron recogidos bajo las mismas condiciones ambientales para no influir en el tamaño de la pupila y la acomodación. Las medidas fueron realizadas en la Óptica Cadarso por el mismo examinador (PNS). Todos los sujetos fueron informados de las pruebas a realizar y firmaron un consentimiento informado.

De cada uno de los sujetos se tomaron los siguientes parámetros: la AV sin corrección con el optotipo de Snellen, la refracción subjetiva (esfera (E), cilindro (C) y eje (α)) y la AV con compensación. En cada uno de los sujetos se determinó la amplitud de acomodación (AA) con la fórmula de Hofstetter a partir de la edad del sujeto (ecuación 1):

$$\text{Amplitud media de acomodación (D)} = AA = 18 - 0.3 * \text{edad} \quad (1)$$

Adicionalmente, se tomó la refracción objetiva con un autorrefractómetro Tomey RC 5000 que proporciona además los datos queratométricos del astigmatismo corneal.

b. Aparatos utilizados

Para realizar estas pruebas se utilizaron los aparatos que se describen a continuación:

Autorrefractómetro

Para determinar el estado refractivo disponemos de métodos subjetivos y objetivos, con la refracción objetiva determinamos la refracción sin que sea necesaria la respuesta del paciente. El autorrefractómetro es un instrumento usado para la refracción objetiva. Utilizaremos los valores obtenidos como punto de partida para el examen subjetivo.

El aparato utilizado fue el autoqueratorrefractómetro Tomey RC 5000. En la figura 3.1 se muestra una fotografía del mismo. Proporciona además del valor de S, C y α , los radios queratométricos de la primera superficie de la córnea, el tamaño pupilar y los índices de regularidad y simetría corneales (KRI y KAI).



Figura 3.1. Autorrefractómetro Tomey RC 5000

Test de Snellen

La medida de la agudeza visual es un test subjetivo con el que tratamos de determinar la capacidad del paciente de discernir optotipos de diferentes tamaños angulares. En la figura 3.2 se muestra una imagen del optotipo de Snellen usado en este trabajo.

E	1	20/200
F P	2	20/100
T O Z	3	20/70
L P E D	4	20/50
P E C F D	5	20/40
E D F C Z P	6	20/30
FELOPE D	7	20/25
DEFPOTEC	8	20/20
LEFODFCY	9	
FDFLYCZO	10	
VERELLYD	11	

Figura 3.2. Tabla de optotipos de Snellen

La tabla de optotipos de Snellen representa letras u optotipos a una distancia correspondiente a visión lejana, que consideramos a partir de seis metros. El paciente ha de ser capaz de discernir de cuál letra se trata a esa distancia. A partir de sus respuestas calculamos su agudeza visual como: $AV = 5' / \alpha$ [minutos]. Véase que la agudeza visual 1 corresponde a ser capaz de discernir una letra que subtiende cinco minutos de arco.

Foróptero

El modelo utilizado es el foróptero manual Nidek RT-600, que se acopla a una columna de refracción de la misma marca. En la figura 3.3 se muestra una imagen de este aparato. Consta de las lentes necesarias para la refracción subjetiva, tanto esféricas como cilíndricas mediante los cilindros de Jackson y una ruleta para cambiar la orientación de estos. Además podemos ocluir uno de los ojos o ambos, anteponer filtros rojo-verde, de Maddox, prismas y lente de retinoscopia. Podemos modificar la DIP y la inclinación del foróptero vertical y horizontal.



Figura 3.3. Foróptero manual Nidek RT-600

c. Procedimiento de las medidas

Como se ha comentado anteriormente, las medidas fueron realizadas en un gabinete optométrico bajo las mismas condiciones y el mismo examinador (PNS).

Una correcta anamnesis, previa a las pruebas, permite determinar que sujetos cumplen los criterios de inclusión para realizar el presente estudio. El procedimiento de las medidas con los sujetos aptos fue el que se describe a continuación.

Medida de AV

Se midió la AV de forma monocular sin corrección óptica. Primero en el ojo derecho y posteriormente en el ojo izquierdo. Para ello, se proyecta la tabla de optotipos de Snellen a la distancia de visión lejana y comenzando por la letra correspondiente a AV de 0.05 hacemos al paciente reconocer las letras hasta que llega a su máxima AV.

Refracción objetiva

Se pide al paciente que apoye barbilla y frente en la mentonera del auto refractómetro para la correcta medida. El paciente observará la imagen de un globo aerostático en la pantalla que tendrá enfrente. Le pediremos que centre su atención en él mientras tomamos las medidas. Le indicaremos que no se preocupe si a veces lo ve nítido y a veces borroso. Con el paciente posicionado solo tenemos que buscar uno de los ojos y alinearnos, y acercarnos o alejarnos hasta encontrar una imagen nítida. Una vez aquí, el aparato se encarga de ajustar la profundidad para enfocar correctamente y de tomar la captura. Tomará medidas de la refracción y de la potencia corneal máxima y mínima así como de su orientación, proporcionando: el valor de la refracción con cilindro negativo, los radios máximo y mínimo corneales y los índices KAI y KRI que nos indicarán la regularidad y simetría corneal.

Refracción subjetiva

Se comienza monocularmente en el ojo derecho del paciente. Se miopiza unas tres dioptrías a partir de la refracción objetiva en el foróptero. Posteriormente, se realiza el procedimiento de Máximo Positivo de Máxima Agudeza Visual (MPMAV) retirando lentes positivas en pasos de +0.25 D (añadiendo lentes negativas en pasos de -0.25 D). Si hemos detectado astigmatismo en la refracción objetiva cuando el sujeto alcance la AV=0.3 haremos el test del círculo horario para determinar su cuantía aproximadamente. Seguimos con el MPMAV hasta que el sujeto alcance una AV= 0.63, momento en el que realizaremos el test de los cilindros cruzados de Jackson para afinar la potencia y el eje del astigmatismo. Se realiza primero el afinamiento del eje y posteriormente el de la potencia. Finalmente, se acaba la refracción subjetiva realizando el MPMAV hasta alcanzar la máxima AV. Se hace lo mismo con el ojo izquierdo. Se anota la refracción final obtenida y la AV alcanzada con la misma.

Prueba de flexibilidad acomodativa monocular en visión lejana

Se ha realizado la prueba de flexibilidad acomodativa en visión lejana para descartar posibles problemas acomodativos. Para ello, se ha utilizado un flipper de -2.00D /neutro. Como test se ha utilizado una línea de agudeza visual inferior a la máxima AV que alcanza con su refracción subjetiva. Esta prueba se realiza monocularmente, primero en el ojo derecho y luego en el ojo izquierdo. En los sujetos mayores de 55 años esta prueba no tiene sentido porque no tienen suficiente acomodación.

d. Análisis de datos

Para el análisis de los resultados los parámetros clásicos de E, C y α obtenidos en la refracción, tanto objetiva como subjetiva, fueron convertidos en los componentes del vector B (M, J_0 , y J_{45}) a partir de las siguientes expresiones [18]:

$$\begin{aligned}M &= E + \frac{C}{2} \\ J_0 &= -\frac{C}{2} \cos(2\alpha) \\ J_{45} &= -\frac{C}{2} \sin(2\alpha)\end{aligned}\tag{2}$$

Donde M representa al equivalente esférico, J_0 representa un CCJ con orientación a 0° y 90° y J_{45} representa a un CCJ con orientación a 45° y 135° . Valores positivos de J_0 representan un astigmatismo a favor de la regla y valores negativos representan astigmatismos en contra de la regla. La componente J_{45} representa astigmatismos oblicuos. Esta representación de la refracción es unívoca, cosa que no sucede en la representación tradicional, donde es más conocido que cualquier refracción se puede expresar también como su traspuesta y en forma bicilíndrica.

Por otra parte, el módulo del vector B (ecuación 3) es el parámetro más idóneo para establecer la relación entre la ametropía y la AV. El módulo de dicho vector se define como:

$$B = \sqrt{M^2 + J_0^2 + J_{45}^2}\tag{3}$$

Los valores de agudeza visual medidos en notación decimal se convirtieron a unidades logarítmicas (notación LogMAR) para su tratamiento estadístico. Los datos obtenidos fueron exportados en una Tabla Excel para su posterior análisis y representación.

Como uno de los objetivos de este trabajo es relacionar el error refractivo del paciente, expresado en el módulo del vector B, con la AV que éste alcanza, es necesario en un principio clasificar las ametropías en función de si la acomodación está en juego o no. En la tabla 3.1 se muestra una clasificación de las ametropías en función del uso de la acomodación. Se ha considerado que los sujetos con astigmatismo mixto no están utilizando su acomodación, ya que el círculo de mínima confusión está situado en la retina o cerca de la misma.

No acomodación	Acomodación
- Miopía	- Hipermetropía
- Astigmatismo miópico simple	- Astigmatismo hipermetrópico simple
- Astigmatismo miópico compuesto	- Astigmatismo hipermetrópico compuesto
- Astigmatismo mixto	

Tabla 3.1. Clasificación de las ametropías en función del uso de la acomodación

En la figura 3.4 se muestra la distribución en porcentajes de las ametropías de los sujetos presentes en este estudio. A continuación se muestra el número de sujetos, edad media promedio y el error refractivo medio de cada una de las ametropías evaluadas.

Miopía:

Nº de sujetos: 36

Edad media: (35.64 ± 15.98) años

Error refractivo: (1.82 ± 1.79) D

Hipermetropía:

Nº de sujetos: 40

Edad media: (52.98 ± 10.21) años

Error refractivo: (1.17 ± 0.86) D

Astigmatismo miópico simple:

Nº de sujetos: 32

Edad media: (39.22 ± 15.38) años

Error refractivo: (0.78 ± 0.55) D

Astigmatismo hipermetrópico simple:

Nº de sujetos: 12

Edad media: (43.25 ± 14.82) años

Error refractivo: (0.46 ± 0.27) D

Astigmatismo miópico compuesto:

Nº de sujetos: 95

Edad media: (33.09 ± 15.13) años

Error refractivo: (2.60 ± 1.61) D

Astigmatismo hipermetrópico compuesto:

Nº de sujetos: 74

Edad media: (53.30 ± 11.53) años

Error refractivo: (1.82 ± 1.21) D

Astigmatismo mixto:

Nº de sujetos: 34

Edad media: (47.41 ± 11.97) años

Error refractivo: (0.98 ± 0.57) D

Emetropía:

Nº de sujetos: 17

Edad media: (47.18 ± 16.80) años

Error refractivo: (0.00 ± 0.00) D

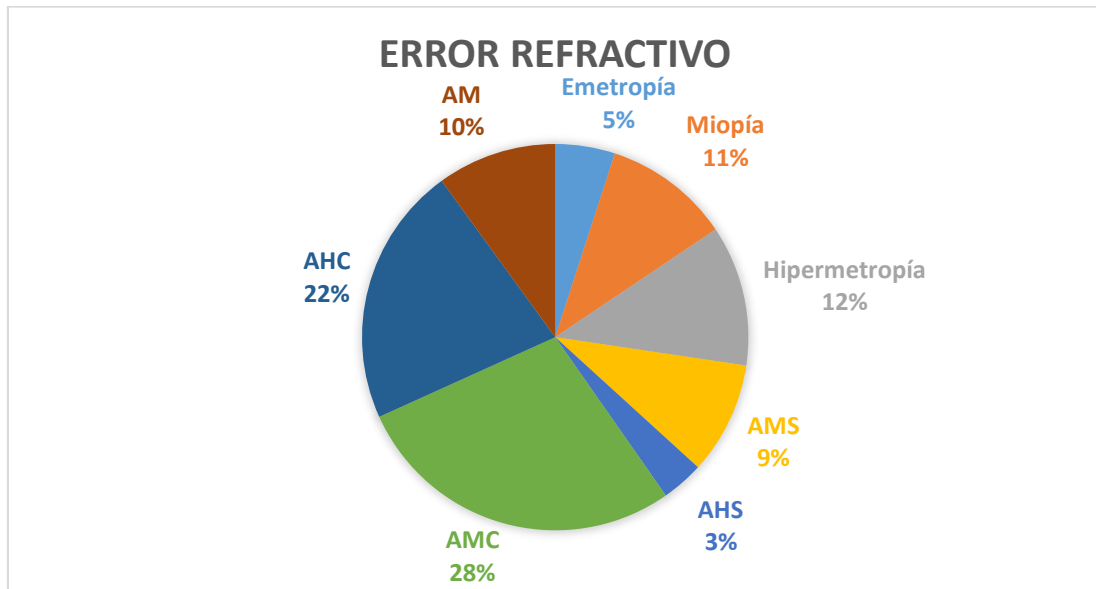


Figura 3.4. Composición de la ametropía de los sujetos del estudio

En el caso en el que la acomodación esté en juego hay que clasificar a los sujetos en función de su amplitud de acomodación que viene determinada por la edad del mismo (véase *tabla 3.2*).

	Edad (años)	Hipermetropía	AHS	AHC
Grupo I	10-20	n=0 em=0 ER=0	n=1 em=14.00 ± 0.00 ER=0.18 ± 0.00	n=2 em=16.00 ± 0.00 ER=3.05 ± 0.41
Grupo II	21-30	n=2 em=22.00 ± 0.00 ER=0.50 ± 0.00	n=1 em=22.00 ± 0.00 ER=0.35 ± 0.00	n=0 em=0 ER=0
Grupo III	31-40	n=2 em=33.00 ± 0.00 ER=0.68 ± 0.18	n=2 em=36.50 ± 4.95 ER=0.62 ± 0.13	n=6 em=38.67 ± 0.52 ER=1.81 ± 0.61
Grupo IV	41-50	n=7 em=47.00 ± 2.83 ER=1.11 ± 1.63	n=4 em=44.25 ± 2.63 ER=0.40 ± 0.22	n=19 em=45.47 ± 3.24 ER=1.96 ± 1.37
Grupo V	51-80	n=29 em=57.93 ± 3.46 ER=1.27 ± 0.63	n=4 em=58.25 ± 4.79 ER=0.53 ± 0.38	n=47 em=59.91 ± 6.95 ER=1.71 ± 1.19

Tabla 3.2. Clasificación de los sujetos del estudio en diferentes grupos de edad dentro de las ametropías en las cuales está en juego la acomodación. Además del número de sujetos (n), se muestra la edad media del grupo (em), expresada en años, y el error refractivo medio (ER), según el parámetro B expresado en D (calculado a partir de las ecuaciones 2 y 3).

4. Resultados

En primer lugar, se muestra la relación entre la refracción subjetiva y la que proporciona el autorrefractómetro para los diferentes componentes del vector B (M, J₀ y J₄₅) en cada una de las ametropías evaluadas.

En la figura 4.1 se muestra la relación entre la refracción objetiva (eje Y) y la refracción subjetiva (eje X) para ametropías esféricas (miopía e hipermetropía). En este caso en concreto sólo representamos la componente M (ametropías esféricas).

Además, para las diferentes ametropías y los distintos componentes se han calculado el valor de la pendiente (b) y el valor de correlación (R²). En las tablas 4.1 y 4.2 se muestran dichos valores.

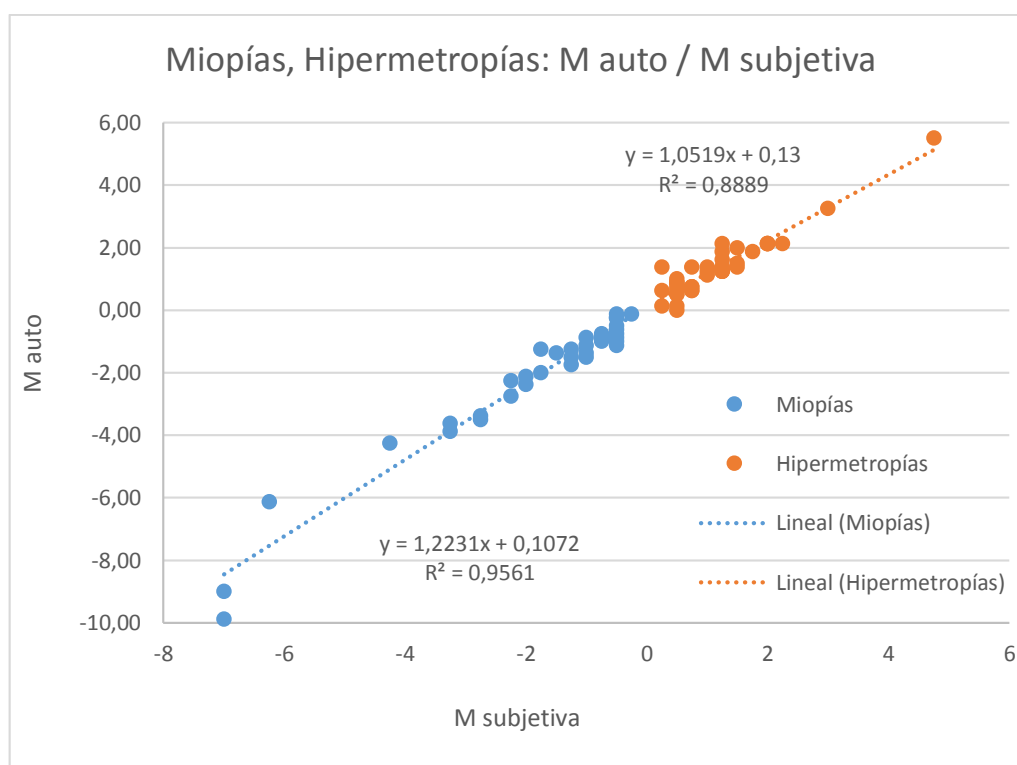


Figura 4.1. Representación de correlación entre refracción subjetiva y objetiva en la miopía e hipermetropía.

En la figura 4.1 se observa la alta correlación de los valores obtenidos para la refracción subjetiva y objetiva que es de R²= 0.956 en el caso de la miopía y de R²=0.889 en el de la hipermetropía. El valor de la pendiente en la miopía es superior a 1, es de b=1.223, lo que quiere decir que la refracción esférica del autorrefractómetro es mayor a la obtenida en la refracción subjetiva. En el caso de la hipermetropía el valor de la pendiente es cercano a 1.

En la tabla 4.1 se muestran los valores obtenidos para ametropías donde la acomodación no está en juego y en la tabla 4.2 para ametropías donde se activa la acomodación.

		Miopía	AMS	AMC	AM
M	b	1,2231+0,1072	0,8261-0,0137	1,038-0,0179	0,6817+0,0949
	R ²	0,9561	0,4102	0,9483	0,18
J0	b	-----	1,0541+0,0342	1,0242-0,0357	1,0407-0,032
	R ²	-----	0,9825	0,9248	0,9442
J45	b	-----	0,9961-0,0106	0,8691+0,0539	0,9893+0,0658
	R ²	-----	0,8739	0,7575	0,9306

Tabla 4.1. Relación entre la refracción objetiva del autorrefractómetro (eje Y) y la refracción subjetiva (eje X) para los tipos de ametropía en los que no está implicada la acomodación: miopía, astigmatismo miópico simple (AMS), astigmatismo miópico compuesto (AMC) y astigmatismo mixto (AM). Los valores de b muestran el valor de la pendiente y la constante (N) de la gráfica $y=Mx+N$. El valor R² es el valor de correlación. Los valores en rojo indican baja correlación.

		Hipermetropía	AHS	AHC
M	b	1,0519+0,13	0,204+0,6112	1,051+0,1037
	R ²	0,8889	0,0047	0,8895
J0	b	-----	1,1536+0,0397	1,0117-0,0077
	R ²	-----	0,8853	0,8821
J45	b	-----	0,994+0,0288	1,0282-0,0076
	R ²	-----	0,5502	0,8505

Tabla 4.2. Relación entre la refracción objetiva del autorrefractómetro (eje Y) y la refracción subjetiva (eje X) para los tipos de ametropía en los que está implicada la acomodación: hipermetropía, astigmatismo hipermetrópico simple (AHS) y astigmatismo hipermetrópico compuesto (AHC).

En segundo lugar, se ha estudiado la relación entre el astigmatismo corneal proporcionado por el autoqueratorrefractómetro y el astigmatismo total obtenido a partir de la refracción subjetiva, para comprobar la regla de Javal.

En la figura 4.2 se muestra el astigmatismo total en los dos componentes del vector (J₀ y J₄₅). Se observa que el componente J₀ toma valores entre -1 y 1 y el J₄₅ toma valores más pequeños entre -0.50 y 0.50.

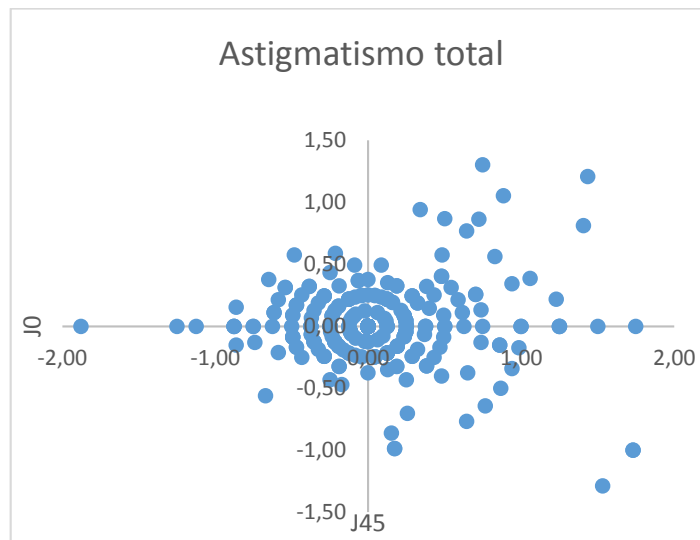


Figura 4.2. Relación para el astigmatismo total representado en J_0 (eje X) y J_{45} (eje Y) para cada uno de los 340 ojos.

En la figura 4.3 se muestra el astigmatismo corneal en los dos componentes del vector (J_0 y J_{45}). Se observa que el componente J_0 presenta valores mayores que el J_{45} y que $J_0 > 0$, lo que indica una prevalencia del astigmatismo a favor de la regla. El componente J_{45} presenta valores muy cercanos a 0 debido a los pocos pacientes que presentan astigmatismo oblicuo en la córnea.

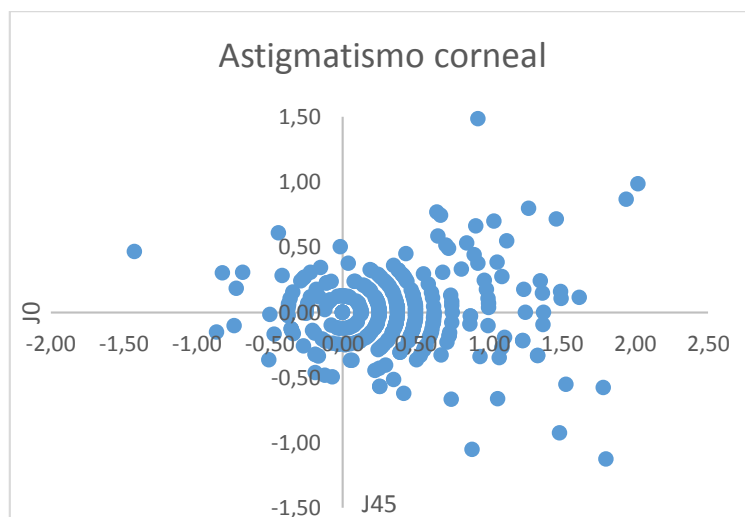


Figura 4.3. Relación para el astigmatismo corneal representado en J_0 (eje X) y J_{45} (eje Y) para cada uno de los 340 ojos.

En la siguiente figura (figura 4.4) se muestra el astigmatismo interno para los dos componentes del vector J. Se observa que tanto J_0 como J_{45} presentan valores menores que en los casos anteriores. En este caso $J_0 > 0$, lo que indica una prevalencia del astigmatismo en contra de la regla y que J_{45} toma valores cercanos a 0 indicando que el astigmatismo interno no es oblicuo.

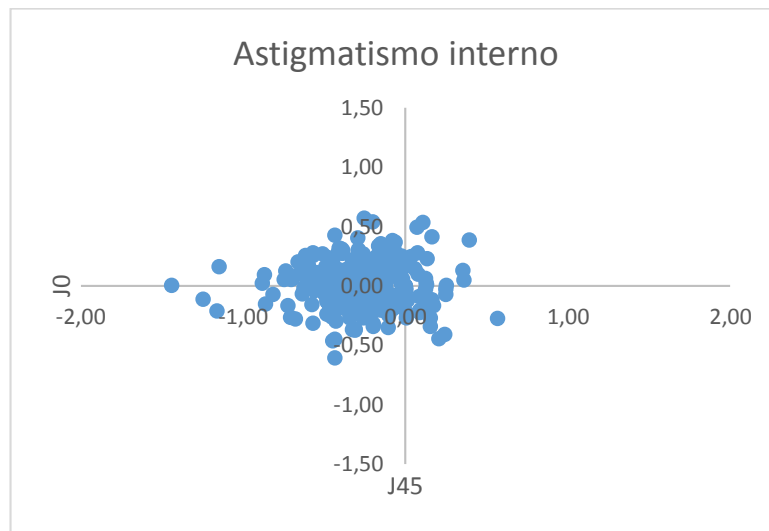


Figura 4.4. Relación para el astigmatismo interno representado en J_0 (eje X) y J_{45} (eje Y) para cada uno de los 340 ojos.

Para el cálculo del astigmatismo interno se han utilizado las siguientes expresiones:

$$L_{J_0} = R_{J_0} - C_{J_0} \quad (3)$$

$$L_{J_{45}} = R_{J_{45}} - C_{J_{45}}$$

Donde L representa el astigmatismo interno, R representa el astigmatismo refractivo y C representa el astigmatismo corneal, en los componentes J_0 y J_{45} . A partir de esos valores se puede obtener el valor del astigmatismo del cristalino como [22]:

$$CL = -2 \cdot \sqrt{(L_{J_0})^2 + (L_{J_{45}})^2} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{L_{J_{45}}}{L_{J_0}}$$

El resultado obtenido es de $CL = -0.72$ D cil 98° .

En tercer lugar, se ha analizado la relación entre el error refractivo del paciente, expresado mediante el módulo del vector B con la AV que este alcanza. Existen diferentes modelos matemáticos para obtener la AV esperada en función del valor de la ametropía esférica, siempre que la acomodación no esté activa. Una expresión utilizada que se ha obtenido de manera empírica por diversos es la siguiente [20]:

$$\text{Log} (AV) = 0.05 - 0.5 \cdot |R| \quad (5)$$

Recientemente se ha propuesto una nueva expresión que tiene en cuenta el valor del tamaño pupilar g [21]:

$$AV = [1 + (0.85 \cdot g \cdot |R|)^2]^{-1/2} \quad (6)$$

En la figura 4.5 se muestra la relación entre la AV con el módulo de B para miopías donde la acomodación no está activa. Además se muestra la AV alcanzada a partir de los modelos matemáticos definidos en las ecuaciones 5 y 6. Se observa que la AV disminuye a medida que aumenta el valor del vector B. Se muestra la ecuación que relaciona la AV con el vector B para nuestros datos.

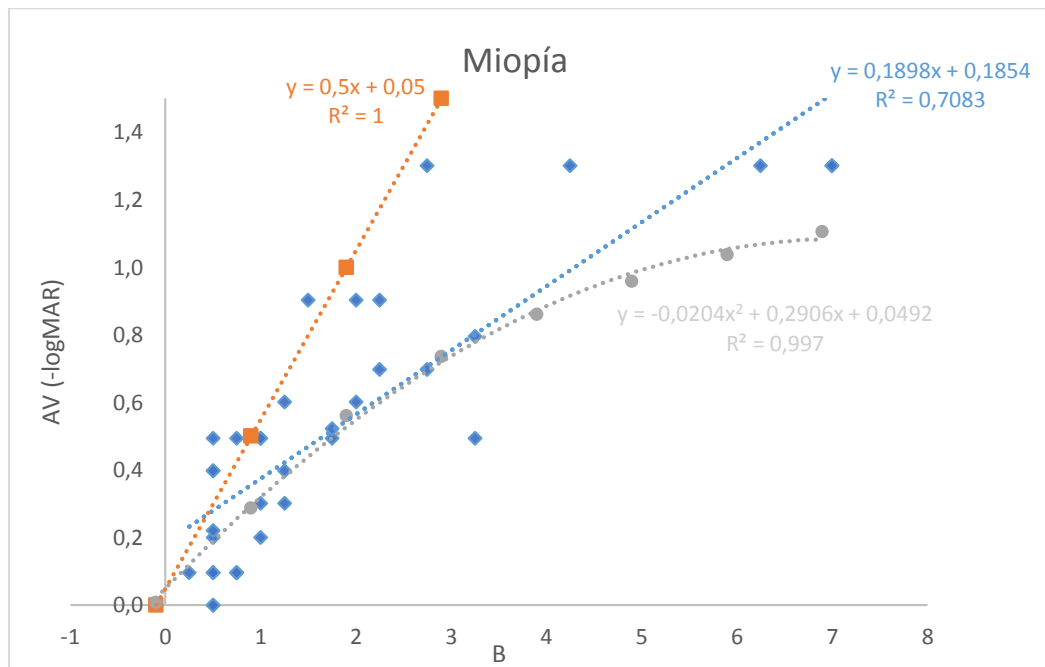


Figura 4.5. Relación entre agudeza visual (eje Y) en notación logarítmica, y B para el caso de la miopía. En naranja aparecen los valores y la línea de tendencia correspondientes a la ecuación 5, en gris los que corresponden a la ecuación 6, para un diámetro pupilar de 4 mm, y en azul nuestros datos. Además, la línea de tendencia de cada uno de los grupos de valores.

Los modelos de las ecuaciones 5 y 6 se pueden adaptar para el caso del astigmatismo pero su uso está limitado a los casos de astigmatismos mixtos en los que el círculo de mínima confusión se encuentra en la retina. Para otros tipos de astigmatismos la mancha de desenfoco toma una forma más o menos elíptica, dependiendo de la posición del intervalo de Sturm respecto de la retina y las expresiones anteriores dejan de ser válidas.

En la figura 4.6 se muestra la relación entre la AV y el vector B para astigmatismos mixtos. Se representan también los modelos matemáticos de las ecuaciones 5 y 6.

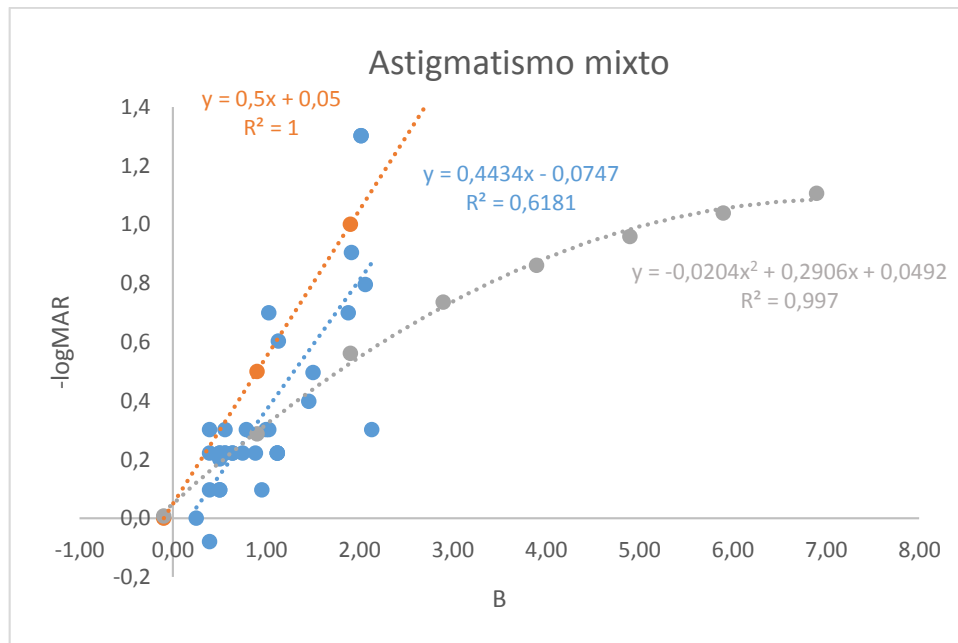


Figura 4.6. Relación entre agudeza visual y B para el astigmatismo mixto. En naranja aparecen los valores y la línea de tendencia correspondientes a la ecuación 5, en gris los que corresponden a la ecuación 6, para un diámetro pupilar de 4 mm, y en azul nuestros datos. Además, la línea de tendencia de cada uno de los grupos de valores.

Para todos los sujetos, la representación en una gráfica de la AV frente a la ametropía, expresada con el vector B, es la figura 4.7. En el eje X se muestran los valores de B y en el eje Y los valores de AV correspondientes. Se representa en color rojo y mediante una línea sólida, la tendencia de nuestros valores. Y se explicita también la ecuación lineal junto al factor de correlación. En un rojo discontinuo se representa la ecuación polinómica de mejor ajuste. Ambas con su factor de correlación. Representamos también en color naranja la ecuación 5 y en color gris la ecuación 6.

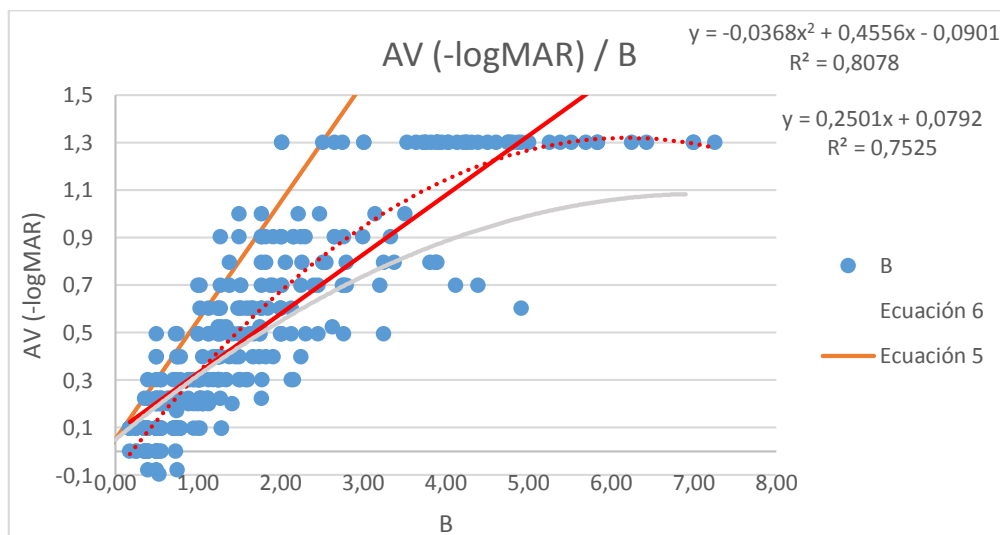


Figura 4.7. Relación entre agudeza visual y B para todos los sujetos.

La variabilidad de los valores representados se aprecia mejor en la figura 4.8, donde se representa el valor que toman el vector B mínimo, el promedio y el máximo para cada una de las agudezas visuales y con ello podemos ver el rango de B para cada agudeza visual. En la figura 4.9 también vemos el rango pero con todos los sujetos representados y con los valores ordenados de menor a mayor para cada una de las agudezas visuales (-0.1, 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1 y 1.3). He de recordar que estas se tomaron con el optotipo de Snellen, que no cuantifica en escala logMAR y se cambiaron para la representación. Esta tabla de optotipos tiene un salto muy grande en los valores más altos de agudeza visual, y muy pocos optotipos en las agudezas visuales bajas, estando el mayor salto en el paso de 0.05 a 0.2 Snellen. Lo que provoca que no estén representados los valores 1.1 y 1.2 de la escala logMAR.

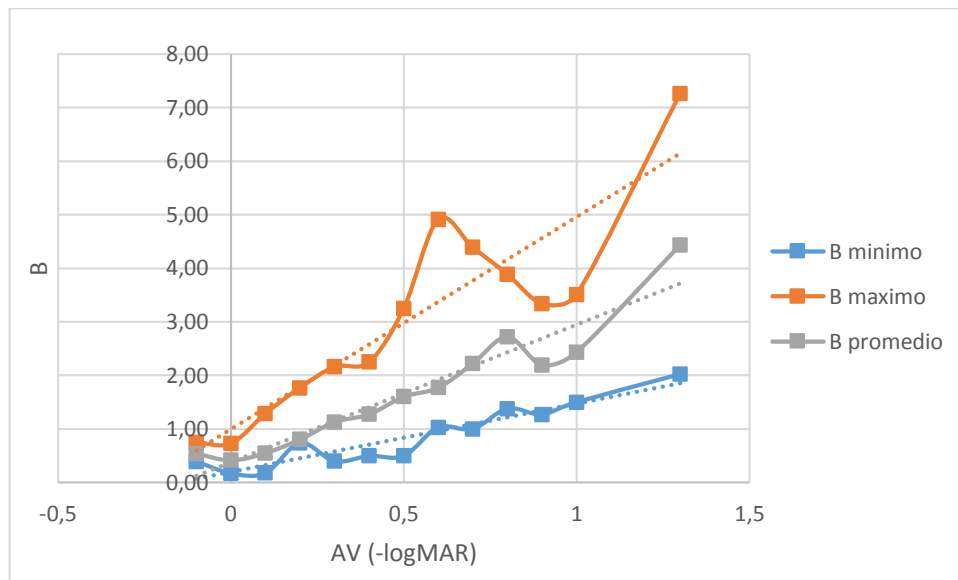


Figura 4.8. Rango de valores que toma el vector B frente a los valores fijos de agudeza visual.

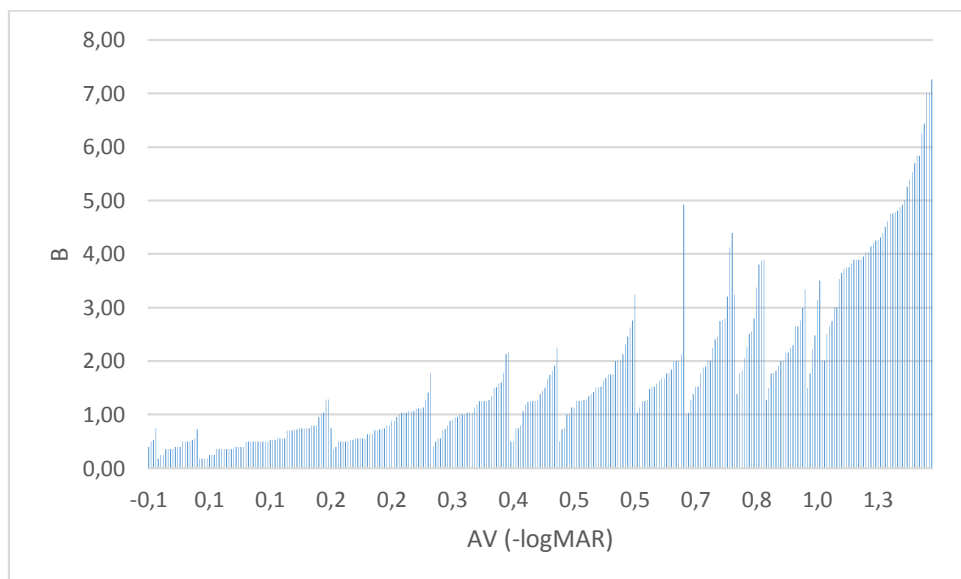


Figura 4.9. Todos los valores de B frente a AV para todos los sujetos del estudio, ordenados de menor a mayor B para cada AV tomada.

Estos valores representados en las figuras 4.8 y 4.9 quedarían expresados en una tabla como la siguiente (tabla 4.3):

AV (-logMAR)	B promedio	Rango		
		B mínimo	B máximo	Diferencia
-0,1	0,54	0,40	0,75	0,35
0	0,42	0,18	0,73	0,55
0,1	0,55	0,18	1,29	1,11
0,2	0,81	0,74	1,77	1,03
0,3	1,13	0,40	2,16	1,76
0,4	1,28	0,50	2,25	1,75
0,5	1,60	0,50	3,25	2,75
0,6	1,77	1,03	4,91	3,88
0,7	2,22	1,00	4,39	3,39
0,8	2,72	1,38	3,89	2,51
0,9	2,20	1,27	3,34	2,07
1	2,44	1,50	3,51	2,01
1,3	4,43	2,02	7,26	5,24

Tabla 4.3. Rango de B para cada AV que ilustra la variabilidad de los valores que toma B para todos los sujetos del estudio, ordenados de menor a mayor AV.

Para terminar, hemos separado las ametropías que permiten un uso activo de acomodación de las que no. En la figura 4.10 se ven representadas ambas gráficas de manera adyacente. Las ametropías con la acomodación activa son hipermetropía, astigmatismo hipermetrópico simple y astigmatismo hipermetrópico compuesto. Las ametropías con la acomodación no activa son miopía, astigmatismo miópico simple y astigmatismo miópico compuesto, y astigmatismo mixto. Hemos considerado que en los casos de astigmatismo mixto el círculo de mínima confusión está en la retina o cerca de la retina.

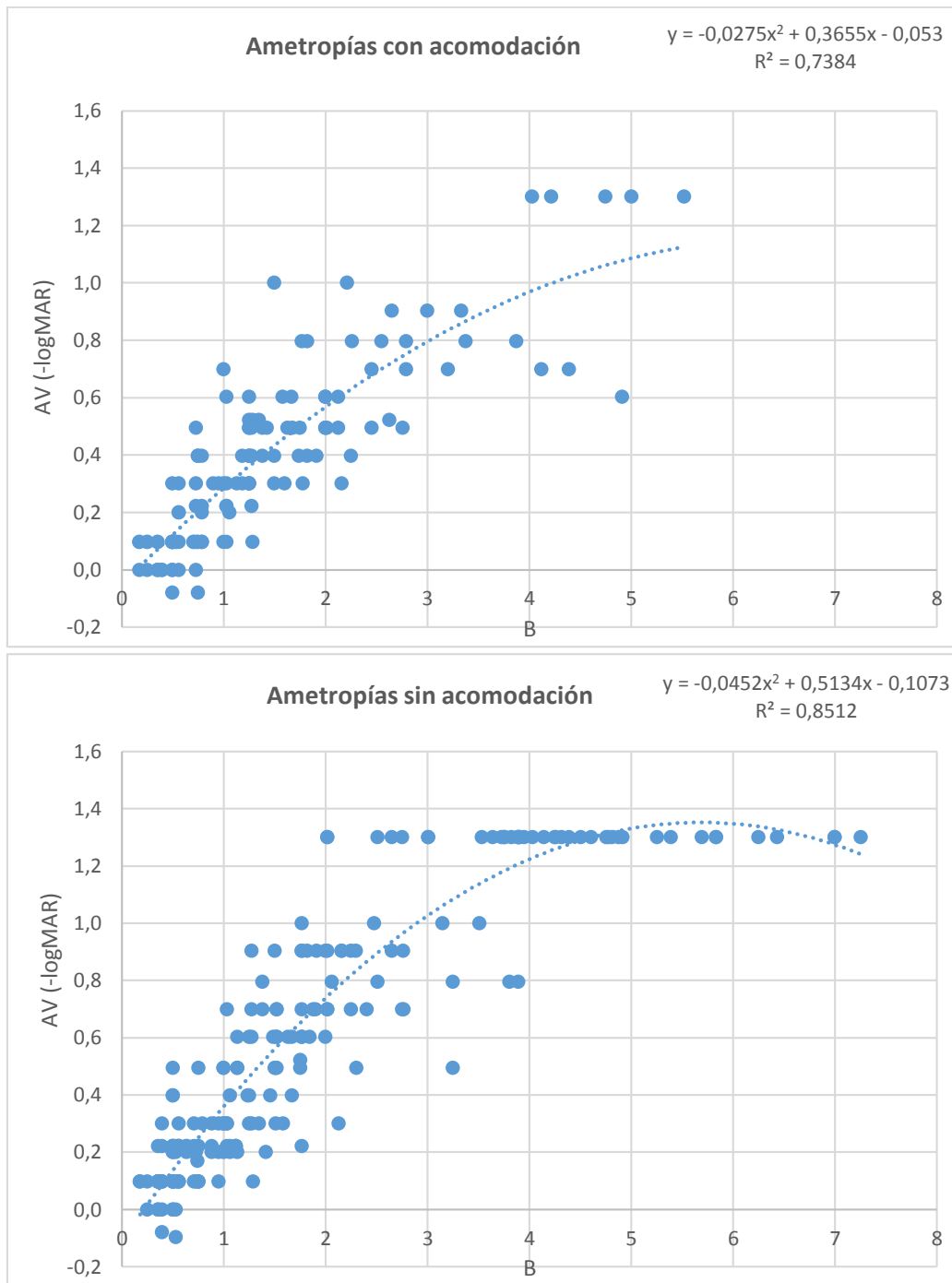


Figura 4.10. Representación de todos los valores de B frente a AV para todos los sujetos del estudio, separados en cuanto a si la acomodación está o no activa.

5. Discusión

En referencia a la relación que la refracción subjetiva y el autorrefractómetro parecen mostrar (figura 4.1), en las ametropías esféricas la refracción objetiva sobrevalora la miopía, es decir, que los valores del AUTO son más altos en valor absoluto, o más negativos. La hipermetropía también es más elevada según el autorrefractómetro, que lo que después se determina en la subjetiva.

En cuanto a las ametropías en las que está presente la acomodación (tabla 4.1), el AUTO sobrevalora el valor de la refracción. Es mayor el valor obtenido en la refracción objetiva que el que obtenemos en la refracción subjetiva. En aquellas ametropías en las que no está presente la acomodación (tabla 4.2), el AUTO sobrevalora la refracción esférica y el astigmatismo recto, no ocurre así con el oblicuo, en el que los valores son algo más bajos para el AUTO en el caso del astigmatismo miópico simple. En cualquier caso estamos hablando de valores de astigmatismo bajos, de $B=0.75$ D de media.

En la comparativa entre el astigmatismo corneal y el astigmatismo refractivo observamos que el corneal toma valores que se extienden en el eje X de la gráfica de la figura 4.3, y que se posicionan a la derecha del eje de ordenadas. Esto quiere decir que toma valores según la regla y que el astigmatismo recto (a 90° o a 180°) prevalece sobre el oblicuo. Esto concuerda con lo que predijo Javal [23]. El astigmatismo interno sin embargo, agrupa valores en el lado izquierdo del eje de ordenadas de la figura 4.4, y concentra sus valores en torno al eje X y en valores muy pequeños en lo que refiere al astigmatismo oblicuo (J_{45}). Predomina de nuevo el astigmatismo recto pero en este caso de valores negativos, en contra de la regla. El resultado final del astigmatismo interno promedio es de -0.72 D cil 98° , que se sitúa muy cerca de lo que predijo Javal, validando una vez más esta relación.

Analizando los resultados que refieren a la última parte del trabajo, vemos que en la gráfica de la figura 4.5, en la que se presentan los valores que toma la AV máxima sin corrección frente al módulo de B, podemos afirmar que hay una tendencia clara a disminuir la AV frente al aumento de la miopía. Si nos fijamos detenidamente en los resultados de la figura, vemos que la tendencia lineal resulta un poco engañosa puesto que los valores referentes a AV $\log\text{MAR}=-1.3$ modifican la tendencia real, que se aprecia intuitivamente algo más vertical. Esto es debido a la falta de optotipos intermedios que establezcan una AV entre 0.05 y 0.2 en la tabla de optotipos de Snellen. Aquellas agudezas visuales que se encuentren en ese rango, no se verán debidamente representadas, falseando también el resultado final. Por ello, trabajar con otros optotipos como podría ser la carta de ETDRS sería más apropiado. En cuanto a los distintos modelos matemáticos representados, parece que nuestros datos se aproximan bastante a los de la ecuación 6 en todo el espectro de datos. Para los errores menores, nuestros valores se adecuan bien a la ecuación 5, mientras que en valores de B por encima de 2.5 vemos como nuestros valores se aproximan más a la ecuación 6.

En el caso del astigmatismo mixto y la relación entre AV y B, representada en la figura 4.6, la ecuación 5 parece que cumple las expectativas y se asemeja mucho en cuanto a la pendiente, pero diferimos algo en el valor de la constante, esto hace que haya una diferencia entre ambas de 0.25 para cada valor de B. Si nos fijamos en la distancia que separa a ambas tendencias en el

eje de abscisas, vemos esta diferencia y como las líneas de tendencia avanzan paralelamente. La ecuación 6 en este caso también funciona bien, aunque no hay en nuestros datos valores de ametropías altos que nos permitan valorar la tendencia.

En la figura 4.7 que suscribe a todos los sujetos a los que hemos medido, llama la atención en primer lugar, la variabilidad de los valores de B que encontramos para cada valor de agudeza visual y que queda mejor expresada en las figuras 4.8 y 4.9 y de forma cuantitativa en la tabla 4.3. A pesar de ello, los datos siguen una tendencia que encaja con lo dicho anteriormente. En esta ocasión la ecuación a la que mejor nos ajustamos es la ecuación 6; hasta valores de B en torno a 2.00-2.50, la adecuación es total; la agudeza visual aproximadamente está en torno a -0.8 y -0.9, algo que también podemos ver en la tabla 4.3 en los valores promedio de B. De nuevo la tendencia a partir de aquí queda en suspense debido a la escasez de optotipos para agudezas de baja visión que muestra este test.

Cada valor de AV cubre un alto rango de ametropías, valoradas con el vector de potencia B, como vemos de forma clara en la figura 4.8. Parece incluso que el rango de dioptrías que permiten alcanzar una agudeza visual determinada aumenta conforme disminuimos la agudeza visual. Esto puede indicar que hay factores que no estamos teniendo en cuenta para delimitar más la relación entre AV y B.

La variabilidad de los factores, mencionados en la introducción, para cada sujeto, hace complicado acotar la relación entre AV y B, y expresar estos resultados de una forma cuantitativa. Factores como las aberraciones de alto orden no han sido medidos en este estudio y podrían explicar alguno de los resultados. También, y ligado a lo anterior, los distintos tamaños de pupila bajo las mismas condiciones ambientales y de iluminación.

Respecto a la comparativa entre ametropías en las que está presente la acomodación (ACA) y las ametropías sin acomodación (ASA), observamos que en el caso de las ASA, la pendiente es más pronunciada, indicando que para un mismo valor de ametropía, obtenemos una menor agudeza visual. Además, los puntos de las ASA tienen una menor dispersión y se puede observar como el factor de correlación es mayor.

Igualmente existe un alto número de valores para $AV=-1.3$ en las ASA. Algunos de esos valores están falseados por la falta de optotipos intermedios como antes hemos comentado.

Es también interesante observar los máximos valores de ametropía que toman aquí las agudezas visuales medias, en el caso de las ACA encontramos valores por encima de $B=4$ que alcanzan agudezas visuales de -0.6 y -0.7; en las ASA todas las ametropías por encima de $B=4$, alcanzan una agudeza visual de -1.3.

6. Conclusiones

El autorrefractómetro sobrevalora los valores de la refracción. La refracción subjetiva es imprescindible para determinar la mejor corrección, medida con la mejor AV.

Se confirma una prevalencia del astigmatismo corneal a favor de la regla y predominan los astigmatismos rectos. Igualmente el astigmatismo interno es por lo general, en contra la regla y también recto.

La AV desciende con el aumento de la ametropía. Aunque los resultados cuantitativamente no han sido concluyentes. Las ecuaciones propuestas por Bennet y Robberts [20], y Smith y col. [21] son adecuadas para describir la relación entre B y AV, sin embargo el alto grado de variabilidad no deja predecir con seguridad cuál será la AV en función del error refractivo y viceversa, si no se acotan mucho más los factores implicados.

La división de los sujetos según la acomodación, aporta un aumento en el factor de correlación. Hay que tenerla en cuenta en un análisis de este tipo.

Se hace necesario el uso de una carta de optotipos ETDRS o similar, para una investigación que cubra todo el rango de valores de AV.

7. Bibliografía:

- [1] Campbell FW, Green DG. Optical and retinal factors affecting visual resolution. *Journal of Physiology* 1965; 181:576–93
- [2] Westheimer G. Visual acuity and spatial modulation thresholds. Ed. Autrum, *Handbook of sensory physiology* 1972:170–87
- [3] Elliott DB, Yang KC, Whitaker D. Visual acuity changes throughout adulthood in normal, healthy eyes: Seeing beyond 6/6. *Optometry and Vision Science* 1995; 72:186–91
- [4] Frisen L, Frisen M. How good is normal visual acuity? A study of letter acuity thresholds as a function of age. *Albrecht V_on Graefes Archiv fur Klinische und Experimentelle Ophthalmologie* 1981; 215:149–157
- [5] Charman WN. Wavefront aberration of the eye: A review. *Optometry and Vision Science* 1991; 68:574–83
- [6] Green DG, Powers MK, Banks M. Depth of focus, eye size and visual acuity. *Vision Research* 1980; 20:827-35
- [7] Ijspeert JK, de Waard PW, Van den Berg TJ, de Jong PT. The intraocular straylight function in 129 healthy volunteers; dependence on angle, age and pigmentation. *Vision Research* 1990; 30:699–707
- [8] Leibowitz H. The Effect of Pupil Size on Visual Acuity for Photometrically Equated Test Fields at Various Levels of Luminance. *Journal of the Optical Society of America* 1952; 42:416-22
- [9] Michaels D. Visual acuity. In *Visual optics and refraction: A clinical approach*. C.V. Mosby Company 1985:259-76
- [10] Peters HB. The relationship between refractive error and visual acuity at three age levels *Am: J. Optom. Arch. Acad. Optom.* 1961; 3:194-9
- [11] Harris WF. Representation of dioptric power in Euclidean 3-D space. *Ophthal. Physiol. Opt.* 1991; 11:130-6
- [12] Thibos LN, Wheeler W, Horner D. Power vectors: an application of Fourier analysis to the description and statistical analysis of refractive error. *Optometry and Vision Science* 1997; 74:367-75
- [13] Muñoz-Escrivá L, Furlan WD. The stenopaic slit: an analytic expression to quantify its optical effect in front of an astigmatic eye. *Ophthal. Physiol. Opt.* 2001; 21:327-33
- [14] Rubin A, Harris W. Closed surfaces of constant VA in symmetric dioptric power space. *Optometry and Vision Science* 2001; 78:744-53
- [15] Raasch TW. Spherocylindrical refractive errors and visual acuity. *Optometry and Vision Science* 1995; 72:272-5
- [16] Millodot M, Thibault C. Variation of astigmatism with accommodation and its relationship with dark focus. *Ophthalmic Physiol Opt* 1985; 5:297-301

- [17] Ukai K, Ichihashi Y. Changes in ocular astigmatism over the whole range of accommodation. *Optometry and Vision Science* 1991; 6:813-8
- [18] Remón L, Tornel M, Furlan WD. Visual acuity in simple myopic astigmatism: influence of cylinder axis. *Optometry and Vision Science* 2006; 83:311–5
- [19] Smith G, Jacobs RJ, Chan CD. Effect of defocus on Visual Acuity as measures by source and observer methods. *Optometry and Vision Science* 1989; 66:430–5
- [20] Bennet and Robberts. *Clinical Visual Optics*. Ed. Butterworth; Oxford 1989.
- [21] Smith G, Jacobs RJ, Chan CD. Relation between spherical refractive error and visual acuity. *Optometry and Vision Science* 1991; 68:591–8
- [22] Remón L, Benlloch J, Furlan WD. Corneal and Refractive Astigmatism in Adults: A Power Vectors Analysis. *Optometry and Vision Science* 2009; 86:1182–6
- [23] Javal E. *Memoires d'Ophthalmometrie*. Ed. Masson: Librairie de l'Academie de Medecine; Paris 1890:130–1
- [24] Grosvenor T, Quintero S, Perrigin DM. Predicting refractive astigmatism: a suggested simplification of Javal's rule. *Am J Optom Physiol Opt* 1988; 65:292–7
- [25] Grosvenor T, Ratnakaram R. Is the relation between keratometric astigmatism and refractive astigmatism linear? *Optometry and Vision Science* 1990; 67:606–9
- [26] Keller PR, Collins MJ, Carney LG, Davis BA, van Saarloos PP. The relation between corneal and total astigmatism. *Optometry and Vision Science* 1996; 73:86–91
- [27] Tong L, Carkeet A, Saw SM, Tan DT. Corneal and refractive error astigmatism in Singaporean school children: a vector-based Javal's rule. *Optometry and Vision Science* 2001; 78:881–7

