

La aberración de astigmatismo

Rafael Navarro

Los términos astigmatismo y aberración están íntimamente ligados, y de alguna manera se refieren al mismo fenómeno, como cuando hablamos de dos caras de una misma moneda. El término aberración, sinónimo de desviación, se aplica en óptica a los rayos de luz que en lugar de incidir en el punto focal de una lente, que sería lo ideal, se desvían y van a parar a otro punto distinto. El astigmatismo, término acuñado por Whewell en 1817, es similar, aunque se refiere no a un rayo, sino a todo el haz de luz que pasa a través de la lente. Cuando todo el haz de luz, proveniente de un punto objeto, pasa por la lente y focaliza en un solo punto imagen, se llama *stigmático*, por mantener una perfecta correspondencia punto a punto entre el objeto y su imagen. Un haz de luz tiene astigmatismo, es decir falta de *stigmatismo*, cuando no focaliza en un único punto. Por lo tanto, los términos de aberración y astigmatismo se refieren al mismo fenómeno físico. De hecho, en la clínica es común denominar astigmatismo irregular a las aberraciones de alto orden que no pueden corregirse con lentes y que suelen carecer de simetría. Más aún, la aberración óptica puede referirse bien a cada rayo, siendo entonces la aberración geométrica o desviación del rayo, o bien puede ser la aberración de onda, cuando hablamos de la deformación de todo el haz de luz. En este último caso, el paralelismo entre astigmatismo y aberración queda aun más patente, ya que la deformación (aberración) del haz de luz hace que este ya no sea *stigmático* sino astigmático. En conclusión cuando decimos aberración de onda o astigmatismo, estamos en realidad hablando de lo mismo, aunque nos refiramos a aspectos ligeramente diferentes. Estos paralelismos y diferencias van a ser tratados con más detalle en este capítulo, además de otros temas de interés como es el impacto del astigmatismo en la calidad de la imagen retiniana, y por tanto en la visión.

En primer lugar, vamos a revisar brevemente qué es y cuales son las causas del astigmatismo regular, entendiendo como tal a una aberración de segundo orden que puede corregirse o compensarse con una lente cilíndrica. El astigmatismo regular aparece en cualquier situación en la que no hay una total simetría de revolución. Pongamos el ejemplo de una lente de superficies esféricas. Las superficies tienen simetría de revolución en torno al eje óptico, de manera que un haz de luz que esté centrado y alineado con dicho eje, no tendrá astigmatismo. Sin embargo, cualquier haz que, bien incida inclinado por venir en una dirección distinta al eje óptico, bien esté desplazado (descentrado) con respecto al eje, presentará astigmatismo. Además de esto, si la superficie óptica carece de simetría de revolución, como el caso de un cilindro, un toro, o

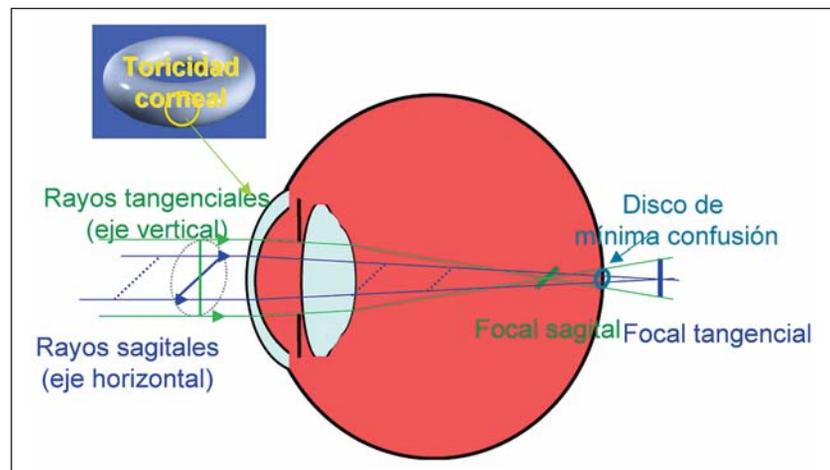


Fig. 1.

es una esfera con deformaciones, entonces el haz de luz, aunque incida alineado y centrado con el eje óptico, presentará astigmatismo a la salida. La figura 1 ilustra la situación en el caso de la córnea, en la que la mayor parte del astigmatismo se debe a la toricidad, es decir presentar distintas curvaturas en los ejes horizontal y vertical (o ejes perpendiculares cuando el astigmatismo es oblicuo).

Al faltar la simetría de revolución, el foco, en lugar de ser puntual, se desdobra en dos segmentos focales, separadas por el denominado intervalo de Sturm. La longitud del intervalo de Sturm es el valor del astigmatismo, que puede medirse tanto en dioptrías como en milímetros; en ojos normales, cada dioptría equivale a una longitud de 0,37 mm a lo largo del eje óptico. Las 2 focales de Sturm, sagital y tangencial, son segmentos de luz, perpendiculares entre sí (ver figura), y cuya longitud es proporcional tanto al astigmatismo como al diámetro de la pupila. Así, para un astigmatismo de +1 D y una pupila de 4 mm, su longitud será de 14 minutos de arco (de campo visual). En la dirección del segmento focal, la agudeza visual será de tan sólo 1/7, mientras que en la dirección perpendicular la agudeza será máxima.

Como se aprecia en la figura 2, el haz de luz al irse propagando desde la focal sagital hacia el centro (cuando el astigmatismo es positivo y al contrario si es negativo), pasa de lineal a ovalado y se va haciendo más redondo hasta que en el centro del intervalo de Sturm adopta una forma aproximadamente circular, denominada círculo de mínima confusión. A partir de aquí vuelve a ovalarse en la dirección perpendicular y se va alargando hasta formar el segmento de la focal tangencial, que es perpendicular a la sagital. El nombre tangencial se debe a que todos los rayos que pasan por un plano paralelo al dibujo (rayos tangenciales) focalizan en un punto del segmento tangencial, mientras que todos los rayos de un plano perpendicular al dibujo focalizan en un punto de la focal sagital. La figura 2 corresponde a un astigmatismo de +1 D en dos casos. Arriba se muestra un ojo ideal que no presenta otras aberraciones de alto orden abajo una situación real en un ojo normal, que sí tiene aberraciones de alto orden. Aquí hemos representado como es la imagen óptica sobre la retina de un punto objeto brillante (que en inglés se denomina *Point Spread Function*, PSF); conforme vamos modificando el estado refractivo utilizando lentes esféricas con las dioptrías indicadas arriba vamos enfocando distintos planos del intervalo de Sturm. Aquí hemos su-

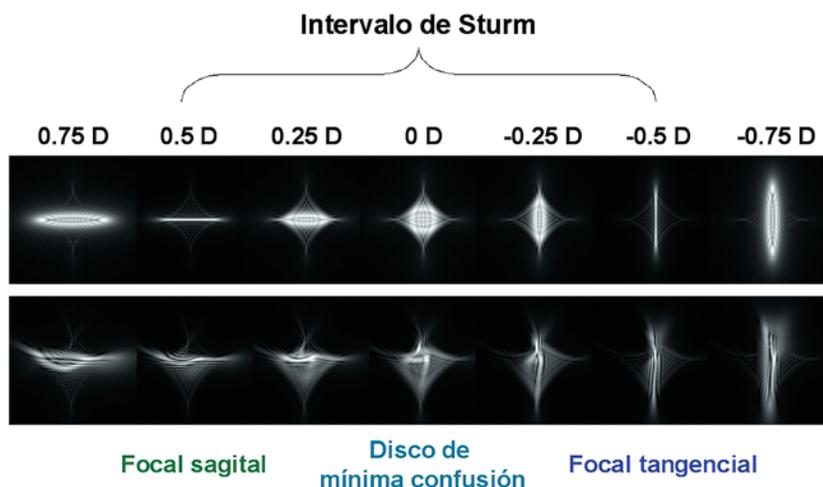


Fig. 2.

puesto que el ojo es emétrepe esférico, por lo que para una corrección de 0 D, tendría enfocado el círculo de mínima confusión en su retina. Podemos apreciar que, dentro del intervalo de Sturm, la calidad de imagen se mantiene bastante homogénea, aunque lo que cambia a un lado y a otro es la visión de los detalles horizontales y verticales, como comentaremos más adelante. Este hecho se ha interpretado a veces como un efecto positivo, ya que supone un aumento de la profundidad de foco, igual al valor del astigmatismo, y que, en combinación con la aberración esférica y la aberración cromática, puede ayudar a paliar la presbicia y en general permite relajar los requisitos de enfoque y por tanto el esfuerzo acomodativo cuando la tarea visual a desarrollar no es especialmente exigente. Sin embargo, el tener una mayor profundidad de foco tiene un importante coste en cuanto a calidad visual. Es decir, el astigmatismo (al igual que el desenfoque y la aberración esférica) permite tener mayor profundidad de foco, pero a costa de perder calidad óptica y por tanto visual. Este efecto negativo se traduce en un emborronamiento de la imagen que produce pérdida de visión de los detalles en la dirección del eje de astigmatismo y es mayor cuanto mayor sea el diámetro de la pupila, siendo muy perjudicial en visión nocturna.

A modo de preámbulo de la relación existente entre el astigmatismo que se obtiene al realizar una refracción y el aberrométrico, vamos a repasar brevemente los tipos y modos en que se manifiesta el astigmatismo. En primer lugar, dependiendo del elemento óptico que lo produce, tenemos el corneal, el total y el interno. El corneal se debe sobre todo a la toricidad (ver figura 1) de la cara anterior de la córnea (tener dos curvaturas diferentes en dos direcciones ortogonales), aunque también contribuye en menor grado el descentramiento de los ejes corneal y pupilar. Todo ello el astigmatismo corneal se atribuye a la cara anterior, pues se estima que la cara posterior sólo contribuye con un 0,2% del total, por lo que se suele despreciar. El astigmatismo total es el que tiene un impacto directo en la visión, por ser el que tiene la imagen en la retina; si bien la contribución de la cara anterior de la córnea suele ser la más importante. De hecho, se llama astigmatismo interno, o suplementario, a la contribución de las demás superficies ópticas y es igual a la diferencia entre el total y el corneal. El cristalino suele presentar astigmatismo; la contribución debida al descentramiento se considera pequeña (proba-

blemente inferior a 0,1 D) pero la suma de las contribuciones de ambas caras pueden ser del orden de la dioptría. No obstante, el astigmatismo del cristalino puede considerarse despreciable en un 49% de casos, es inverso en un 44% y directo en un 7%. Además suele ser ortogonal al corneal, por lo que suele compensar parcialmente este último.

Otra clasificación es astigmatismo axial versus periférico (también llamado oblicuo o fuera de eje). El axial sería el que se da en el centro del campo visual (fóvea) y se debe fundamentalmente a la toricidad de la córnea, mientras que el oblicuo se debe al ángulo de campo visual. Este astigmatismo aumenta rápidamente hacia la periferia, aproximadamente $A(\theta) = D\sin^2\theta$, donde D es la potencia del ojo (60 Dioptrías) y θ es el ángulo de campo visual. Para $7,5^\circ$ de campo, este astigmatismo oblicuo ya alcanza ya +1 D, y a 60° en la periferia suele alcanzar valores de +5 D.

Ya se ha comentado la diferencia entre regular e irregular. Astigmatismo irregular es en realidad el conjunto de aberraciones de alto orden que no puede compensarse con lentes convencionales, mientras que el regular se corrige con una lente cilíndrica. Aquí es donde enlazamos de forma natural con la aberrometría. Los aberrómetros modernos nos dan una medida mucho más completa del estado refractivo, incluyendo los diferentes órdenes de aberraciones. Como vamos a ver a continuación, las aberraciones suelen clasificarse en varios modos, y el astigmatismo constituye un grupo particular de modos de aberración con determinadas características de simetría. En aberrometría, la idea básica es que una lente perfecta debe de producir un haz de luz esférico perfecto, de forma que toda la luz que pasa por la pupila converja hacia el centro de esa esfera, que es el foco. Según la luz se va propagando esa esfera se va cerrando hacia el foco. Esa esfera, o mejor dicho el trozo de esfera que pasa por la pupila, se denomina frente de onda; en aberrometría se toma el frente de onda justo en el momento y lugar en el que pasa por la pupila. Ahora bien, el ojo humano no es perfecto ópticamente, por lo que en lugar de un frente de onda esférico ideal, tendremos otro más o menos deformado. Pues bien, la diferencia entre el frente de onda real y el esférico ideal, es lo que llamamos aberración de onda. Lógicamente, cuanto menor sean las aberraciones, el frente de onda será más parecido a una esfera, y al contrario, cuanto mayores sean las aberraciones. En aberrometría, al igual que en topografía corneal se resta la esfera, y se representa justamente la diferencia, que en este caso es justamente la aberración de onda. Esta aberración puede tener formas muy variadas, pero siempre puede descomponerse como una suma de modos que aparecerán en mayor o menor proporción. Esa proporción es justamente el valor de cada aberración. Los modos de aberración se clasifican en órdenes, y dentro de cada orden pueden presentar distintas simetrías. A mayor orden, mayor complejidad y mayor número de simetrías posibles. Así, el primer orden de aberración sólo corresponde al modo prismático, y sólo tiene 2 simetrías que son el prisma horizontal y el vertical. Es decir, el primer orden se corrige con prismas, que son elementos ópticos de caras planas. Estas aberraciones de primer orden no se pueden medir con aberrómetros convencionales, pero no tienen ningún impacto en la calidad de imagen (sólo tienen importancia en estrabismos, etc.) El segundo orden, es aquel que se corrige con lentes convencionales, con esferas o cilindros, y corresponden a las ametropías clásicas que son el desenfoque y el astigmatismo (de segundo orden). El ojo humano normal pre-

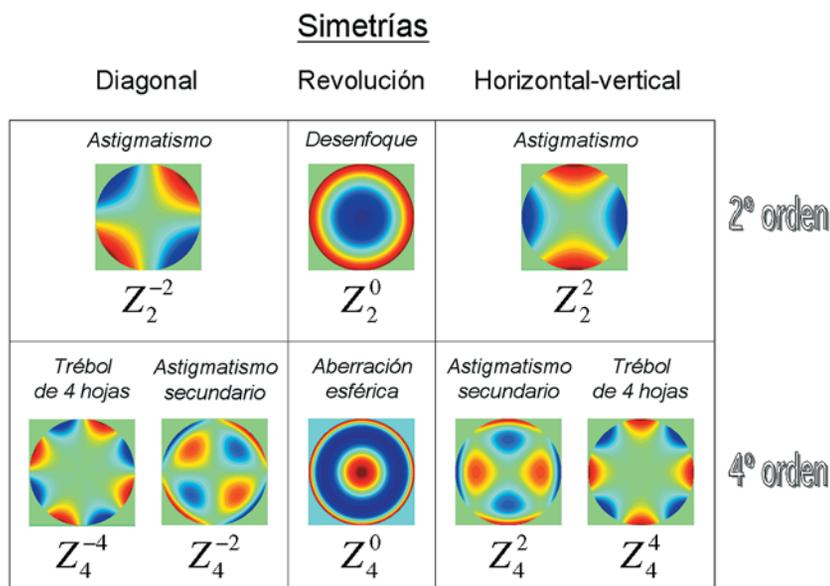


Fig. 3. Quadrafoil = cuadrado de hojas o trébol de 4 hojas

senta todo tipo de aberraciones, aunque su magnitud disminuye muy rápidamente con el orden, de tal manera que el segundo orden representa 2/3 del total aproximadamente y afortunadamente es muy fácil de corregir con lentes. El tercer orden, coma y trébol (*trefoil* en inglés) suele tomar valores importantes, así como algunas de cuarto orden, como la esférica y el astigmatismo secundario. Las aberraciones de órdenes más altos suelen ser tomar ya valores despreciables en ojos normales. La forma que adopta la aberración de onda para cada uno de estos modos se muestra en la figura 3. Arriba están las aberraciones de segundo orden y abajo las de cuarto orden. En la parte superior, vemos que hay dos modos de astigmatismo de segundo orden, el diagonal (z_2^{-2}) a la izquierda, y el horizontal/vertical (z_2^{+2}) a la derecha. Este último suele tomar valores significativamente mayores que el diagonal.

Estos dos modos sirven para describir cualquier eje de astigmatismo, puesto que independientemente del eje que presente el astigmatismo, éste se puede descomponer como una suma vectorial de los dos, como veremos luego. Una característica importante del astigmatismo, que la diferencia de otras aberraciones como el coma, es su simetría par o central. La simetría par significa que el astigmatismo se presenta en órdenes pares (2º, 4º, etc.) y la simetría central, que el valor que toma el frente de onda en cualquier punto de la pupila, es el mismo que en el punto simétrico que esté en el lado contrario con respecto al centro. El astigmatismo se caracteriza por tener los índices de simetría +2 y -2 para cualquier orden. Así tenemos que (z_2^{-2}) es el astigmatismo diagonal de segundo orden (o primario); (z_4^{-2}) es el de cuarto orden (secundario); (z_6^{-2}) el de sexto orden (terciario); etc. Lo mismo se aplica para el índice de simetría +2. En la fila de debajo de la figura vemos los modos de cuarto orden, con la aberración esférica en el centro (índice de simetría igual a 0), los astigmatismos secundarios (± 2) y los de trébol de cuatro hojas (± 4), y como antes con orientación diagonal a la izquierda, y horizontal-vertical a la derecha. El índice de simetría en realidad nos está diciendo

el número de lóbulos (u hojas) de cada modo. Así el desenfoque y la aberración esférica tienen 0 lóbulos y por tanto máxima simetría; el astigmatismo se caracteriza siempre por tener 2 lóbulos; el trébol de 4 hojas 4; de la misma manera que en las de tercer orden tenemos el coma ($z_3^{\pm 1}$) con un lóbulo (índice ± 1) y el trébol ($z_3^{\pm 3}$) (índice ± 3).



Fig. 4.

Cada uno de estos modos de aberración, se caracteriza por producir un patrón determinado en la imagen. Las correspondientes imágenes PSF que producen en el caso del astigmatismo se muestran en la figura 4 para la orientación diagonal. El trébol de 4 hojas, si bien ya no se puede considerar astigmatismo puro, comparte la simetría par, y en ocasiones podría ir asociado al astigmatismo primario. De hecho, los modos de aberración puros raramente aparecen solos y los de alto orden suelen acompañar a los de bajo orden, pero en mucha menor magnitud, de la misma forma que los armónicos acompañan a la nota fundamental; de tal manera que la proporción en que aparecen los armónicos es la que caracteriza el timbre de un instrumento. Podríamos decir que cada ojo tiene un «timbre» óptico diferente según la proporción en que aparecen las aberraciones fundamentales (astigmatismo, coma, trébol, esférica) y sus armónicos. Así el astigmatismo primario de segundo orden suele aparecer en combinación con el secundario de cuarto orden; de la misma manera la aberración esférica de cuarto orden suele ir asociada a la esférica de sexto orden. Pero como hemos dicho, y al igual que en los armónicos, los valores que presentan caen muy rápidamente al aumentar el orden, y también con el valor del parámetro de asimetría. Así, en cuarto orden, la aberración esférica (índice de simetría 0) es la que suele presentar mayor magnitud, seguida con valores mucho menores por el astigmatismo secundario (índice ± 2) y con valores ya muy bajos por lo general, con el trébol de 4 hojas (índice ± 4).

Un aspecto práctico importante es cómo relacionar y pasar del astigmatismo aberrométrico a otro tipo de mediadas clásicas como es la refracción (subjativa u objetiva). Para ello hay que recordar la relación existente entre los rayos de luz (óptica geométrica) y los frentes de onda (óptica ondulatoria o física). Si volvemos al caso ideal de frente de onda esférico, que converge a un punto, que es el centro de la esfera, los rayos de luz serán pues radios de la esfera que son perpendiculares (o normales) a la superficie del frente de onda. Esta es la relación que se cumple en general: Los rayos de luz serán perpendiculares (normales) al frente de ondas cualquiera que sea la aberración. De esta manera, podemos aplicar la geometría y pasar de la aberración de onda a la de rayo calculando la derivada del frente de onda, y al revés integrando. De esta manera se obtienen las expresiones para pasar del astigmatismo de fren-

te de onda, de segundo orden, (expresado generalmente en micras o en longitudes de onda), a la refracción cilíndrica. El astigmatismo A , en dioptrías viene dado por:

$$A = 4 \sqrt{\left(z_2^{-2}\right)^2 + \left(z_2^{+2}\right)^2} / R^2$$

donde los z son los 2 modos del astigmatismo del frente de onda y R es el radio de la pupila. El eje del astigmatismo, en grados, viene dado a su vez por el arco cuya tangente es el cociente del astigmatismo diagonal y el horizontal:

$$\phi = 90 + \frac{90}{\pi} \arctan\left(-\frac{z_2^{-2}}{z_2^{+2}}\right)$$

Hay que tener en cuenta, no obstante, que aunque existen estas reglas de conversión sencillas, el astigmatismo aberrométrico no coincidirá en general con el que se obtiene mediante refracción (objetiva o subjetiva), retinoscopía u otro método clásico. En primer lugar, para que coincidan, los radios de pupila deben de ser iguales en ambas medidas, lo cual no suele suceder. Pero sobre todo, la presencia de aberraciones de alto orden hacen que la compensación óptima (la que en teoría se obtiene en una refracción) no es aquella que cancela los coeficientes del astigmatismo aberrométrico (los Z_2), sino que puede ser significativamente distinto. Cabe prever que en un futuro no muy lejano, los aberrómetros podrán predecir con muy alta precisión la refracción óptima del paciente, pero si nos limitamos a tomar directamente la lectura del aberrómetro, podrán encontrarse discrepancias significativas que pueden llegar a media o incluso una dioptría.

Para finalizar este capítulo, comentaremos brevemente el impacto que tiene el astigmatismo sobre la visión. En el pasado se especuló mucho con la idea de que el astigmatismo produce figuras alargadas, e incluso se llegó a decir que el Greco debió de padecer astigmatismo, como posible causa de su peculiar estilo de pintura. Si bien es verdad que cuando estamos cerca de una de las dos focales, la imagen de un punto (PSF) se alarga, lo que ocurre con objetos extensos es que estos se emborronan. Es importante recalcar, que los alargamientos o encogimientos constituyen un tipo diferente de aberración óptica que se denomina distorsión y poco tiene que ver con el astigmatismo. La visión en presencia de astigmatismo queda ilustrada en la figura 5. Se presenta aquí las imágenes ópticas de un optotipo cuya escala corresponde a una línea de agudeza 0,2. En la fila superior se ha variado la magnitud del astigmatismo, de 0 D; +0,5 D y +2 D respectivamente de izquierda a derecha. Puede apreciarse que en el caso de media dioptría, las barras horizontales pierden mucho contraste y nitidez, pero el optotipo se sigue reconociendo, mientras que con +2 D, estas barras horizontales han desaparecido por completo y el optotipo es totalmente irreconocible. En la fila de abajo podemos ver el efecto del eje del astigmatismo para un caso intermedio de +1 D. El optotipo está severamente distorsionado en todos los casos, pero cuando estamos en la focal horizontal, este optotipo en particular todavía se reconoce, mientras que por el contrario si pasamos a la vertical (derecha) su imagen sería totalmente irreconocible. Cuando el

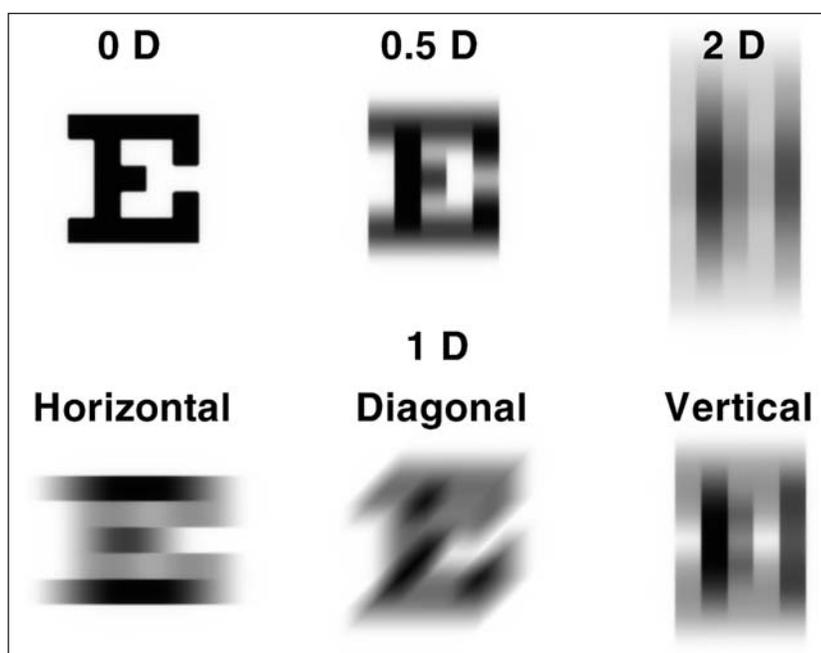


Fig. 5.

astigmatismo es diagonal la imagen se distorsiona y asemeja más bien a una Z por lo que el paciente daría una respuesta equivocada.

En conclusión, el astigmatismo es la segunda aberración por orden de importancia tras el desenfoco (ametropía esférica), tanto por presentar valores más altos como por ser más perjudicial para la visión. Afortunadamente su compensación óptica es relativamente sencilla, con lentes convencionales; existiendo además un importante abanico de técnicas quirúrgicas que pueden aplicarse para su corrección.

BIBLIOGRAFÍA

- Atchison D, Smith G (2000). Optics of the Human Eye, Boston, MA, Butterworth-Heinemann.
- Bennett A, Rabbetts R (1998). Bennett & Rabbetts' Clinical Visual Optics. Boston MA, Butterworth-Heinemann.
- Le Grand Y, El Hage SG (1980). Physiological Optics. Berlin-Heidelberg, Springer Verlag.
- Lotmar W, Lotmar T (1974). «Peripheral astigmatism in the human eye: experimental data and theoretical model predictions.» J. Opt. Soc. Am. 64(4): 510-3.
- Mahajan V (1991). Aberration Theory Made Simple. Bellingham, WA, SPIE Optical Engineering Press.
- Mouroulis P, MacDonald J (1997). Geometrical Optics and Optical Design. Oxford, UK, Oxford University Press.