

El GRIN del cristalino como elemento compensador de las aberraciones oculares.

José Fernández–Dorado^{1*}, José A. Díaz², Josep Arasa³

1 Snelloptics, Prat de la Riba, 35. 08222–Terrassa.

2 Departamento de Óptica. Universidad de Granada. Edificio Mecenas. 18071–Granada

3 CD6–Universidad Politécnica de Catalunya. Rambla de Sant Nebridi, 10. 08222–Terrassa

<http://www.ugr.es/local/jadiaz>

1. Introducción

La estructura fisiológica del ojo humano sigue siendo ampliamente estudiada, tanto la geometría óptica y disposición de sus elementos, como, en concreto y por el gran interés que suscita, la variación del índice de refracción en el interior del cristalino. Trabajos pioneros como los de Gullstrand[1], que propuso por primera vez una distribución no homogénea del cristalino, o el de Blaker[2], generalizaron la idea hacia un medio GRIN que caracterizaría al cristalino, han permitido avanzar y proponer modelos finitos de ojo [3,4] que permiten predecir de una manera más precisa los resultados obtenidos experimentalmente de las aberraciones oculares. Las medidas experimentales son técnicas de difícil aplicación, y obtener resultados medios representativos de una población es una tarea desafiante dada la alta variabilidad entre sujetos. Además, el ojo es un sistema óptico que evoluciona significativamente con la edad, esto complica aún más la medida experimental [5, 6,7].

En trabajos publicados recientemente[3], otro aspecto importante del estudio de la calidad de imagen retiniana es el que se deriva del descentramiento y/o giro relativo entre los elementos que componen el ojo, como la córnea, cristalino y el iris.[8] Los resultados mostrados en estos trabajos muestran por ejemplo como la córnea presenta una contribución importante a las aberraciones totales de Esférica, Coma y Astigmatismo separando las contribuciones en términos horizontales y verticales. Sin embargo, y hasta nuestro conocimiento, no se encuentran en la literatura trabajos que estudien el papel que juega el la variación con la edad del perfil GRIN del cristalino en las aberraciones oculares, aspecto éste debido a la ausencia hasta muy recientemente de modelos esquemáticos de ojo que incluyan un perfil GRIN para el cristalino que varíe con la edad, y que el modelo en conjunto describa con buena bondad la calidad de imagen retiniana.

El objetivo de este trabajo, por tanto, es estudiar la contribución del perfil GRIN a las aberraciones de tercer orden (esférica, coma y astigmatismo) y su variación con la edad, a través de un modelo de ojo esquemático publicado recientemente[9] con la edad y compararlas con las introducidas por la córnea y las superficies del cristalino, viendo de esta forma cual su efecto a nivel global. Esto es posible, dado que se puede a través de la matriz ABCD del perfil GRIN del cristalino[10], obtener los parámetros paraxiales de un rayo axial y otro marginal necesarios para determinar las aberraciones de tercer orden del perfil GRIN utilizando las expresiones publicadas por Sands[11].

2. Método

El procedimiento de trabajo se esquematiza en la Fig. 1 y está dividido en 4 partes fundamentales. Basado en el modelo de ojo de Díaz *et al*[9], se han obtenido los datos de los rayos paraxial y marginal para todas las superficies y variando la edad en el rango que abarca de 20 a 65 años para un sujeto emétrope. A partir de este trazado de rayos, el método se divide en dos partes, por un lado se hace uso del método de la matriz ABCD[10] para obtener la contribución a las aberraciones debido al perfil GRIN del cristalino, y por otro, se tiene en cuenta la contribución a las aberraciones debido al descentramiento y/o giro del iris con respecto a la córnea, y del cristalino con respecto al iris. Con los resultados de cada contribución, se

* e-mail: jose.fernandez@snelloptics.com

obtienen los valores totales para cada tipo de aberración. Para hallar numéricamente el trazado de rayos se ha usado el software de diseño óptico ZEMAX-EE. En este sentido, hay que notar que dicho software, no contempla, hasta su última versión, la posibilidad de calcular los coeficientes de Seidel para elementos que contienen un gradiente de índice. Además, tampoco proporciona dichos coeficientes adecuadamente si el sistema contiene elementos que poseen descentramientos y/o giros.

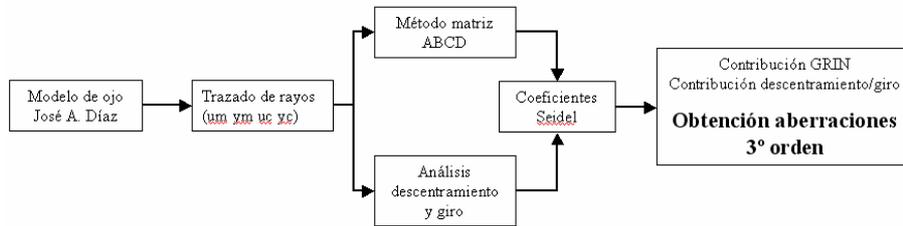


Fig. 1: Esquema de trabajo

2.1 Contribución a las aberraciones

Como ya se ha introducido, en este trabajo se estudia las aberraciones de tercer orden, el medio GRIN del cristalino y el descentramiento y/o giro de la córnea y cristalino. Las contribuciones a cada aberración quedan separadas en 4 partes bien diferenciadas:

$$\begin{aligned}
 SI &= SI_{GRIN(superficie)} + SI_{GRIN(transferencia)} + SI_{d/g(cornea)} + SI_{d/g(cristalino)} \\
 SII &= SII_{GRIN(superficie)} + SII_{GRIN(transferencia)} + SII_{d/g(cornea)} + SII_{d/g(cristalino)} \\
 SIII &= SIII_{GRIN(superficie)} + SIII_{GRIN(transferencia)} + SIII_{d/g(cornea)} + SIII_{d/g(cristalino)}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

En la parte izquierda de las Ec. 1, se contemplan los 4 sumandos. En primer lugar aparece la contribución a la refracción en las superficies del cristalino debido al perfil GRIN, el segundo sumando tiene en cuenta a la contribución a las aberraciones debida al paso de la luz a través del propio GRIN, por tanto, ésta es una contribución de transferencia, y finalmente, en tercer y cuarto, lugar se encuentran las contribuciones a cada aberración de la córnea y cristalino debidas a sus descentramientos y giros[12].

3. Resultados y discusión

De acuerdo con los métodos anteriores descritos, los resultados obtenidos se exponen en las Fig. 4. Las contribuciones quedan separadas según los términos de la Ec. 2. El análisis y discusión de resultados se hace a continuación separando los comentarios para cada una de las contribuciones a la aberración Esférica, Coma y Astigmatismo respectivamente.

3.1 Contribución a la aberración ESFERICA (Fig. 4 a)

La aberración esférica aumenta con la edad, como se ve en la Fig. 4, el cristalino no consigue compensar la aberración introducida por la córnea. La contribución del GRIN se presenta con valor negativo tal y como indican trabajos como el de Smith y Atchison [13]. Esta contribución del GRIN compensa la introducida por el cristalino y la córnea. De esta manera, el GRIN actúa como un elemento de compensación de la aberración esférica en tercer orden. Los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud que los medidos por Guirao[14] así como los resultados publicados por Radhakrishnan & Charman [3].

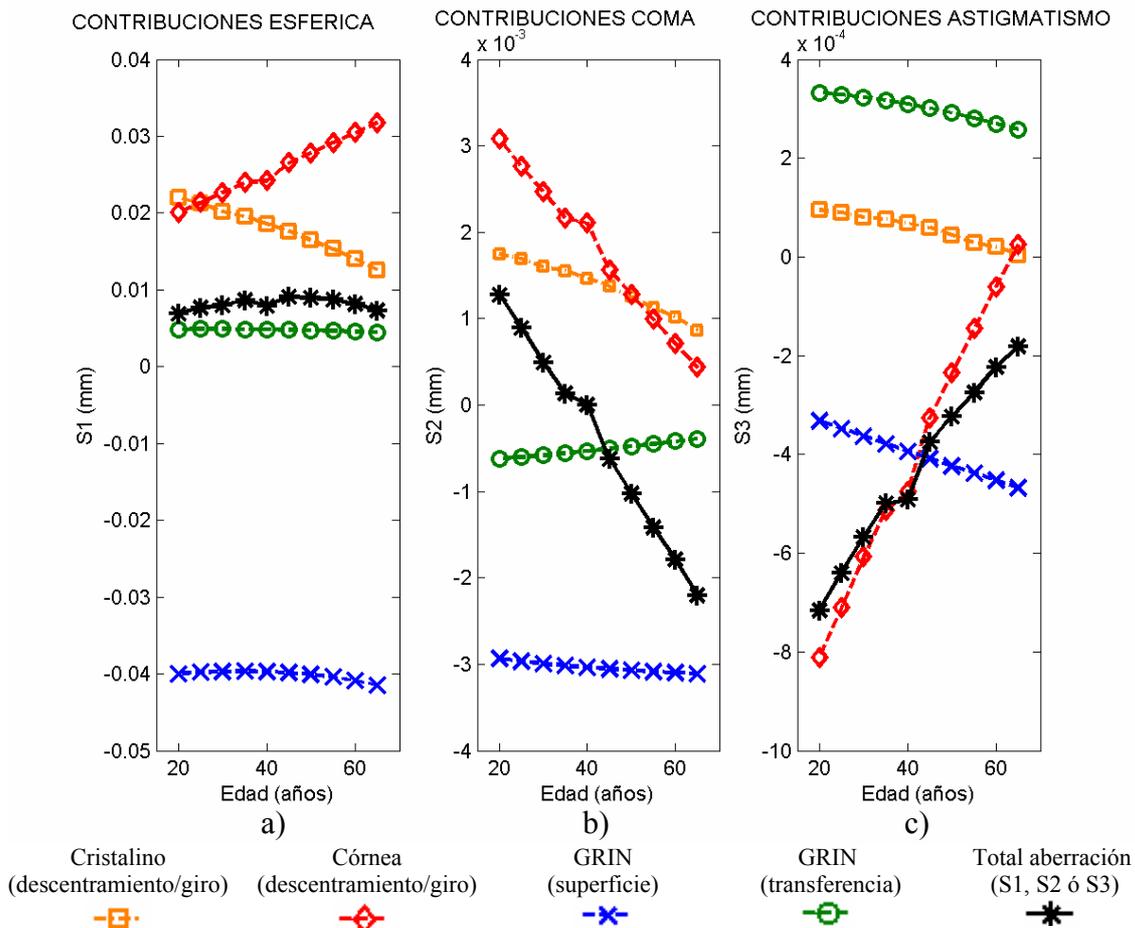


Fig. 4: Análisis aberración ESFÉRICA, COMA y ASTIGMATISMO

3.2 Contribución al COMA (Fig. 4 b)

Tanto la córnea como el cristalino contribuyen al Coma de manera positiva y decreciente con la edad. Sin embargo el GRIN actúa, al igual que en el caso de la aberración Esférica como un elemento compensador de esta aberración provocando incluso un cambio de signo. Es interesante comentar aquí que la córnea ha sido modelada con un desplazamiento en el eje horizontal con respecto al iris, lo que provoca que el Coma aquí calculado sea una mezcla de coma horizontal y vertical con mucha más contribución horizontal, los resultados obtenidos por RADhakrishnan & Charman[3] para el coma horizontal son del mismo orden de magnitud que los resultados obtenidos mediante este modelo y también concuerdan con los publicados por los trabajos experimentales de Guriao[14].

3.2 Contribución al ASTIGMATISMO (Fig. 4c)

En el caso del astigmatismo, la córnea introduce mayor astigmatismo que no es compensado con la edad, su valor disminuye en valor absoluto con la edad. El GRIN por su parte no compensa en este caso ya que tanto la contribución superficial como la de transferencia tienen valores muy semejantes pero con signo contrario. Los valores obtenidos para el astigmatismo están en concordancia con los valores típicos situados en torno a 0.3micras en valor absoluto según medidas de aberrómetros.[8]

4. Conclusión

Se presenta un modelo de ojo teórico que reproduce valores experimentales y teóricos ya publicados tanto para aberración ESFÉRICA, COMA y ASTIGMATISMO. El modelo proporciona información útil sobre datos de parámetros de difícil adquisición experimental estudiando el impacto del perfil GRIN en las

aberraciones de tercer orden con la edad. Se ha comprobado que el perfil GRIN actúa como elemento compensador de las aberraciones oculares en tercer orden.

5. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la ayuda en este trabajo del Ministerio de Ciencia y Tecnología a través de la financiación del proyecto FIS2008-05071.

Bibliografía

- [1] Helmholtz H, A Gullstrand, J von Kries, W Nagel, *Handbuch der physiologischen Optik* (Voss, Hamburg, 1909)
- [2] J. W. Blaker, "Toward an adaptive model of the human eye", *J. Opt. Soc. Am.* **70**, p. 220-223 (1980).
- [3] Hwey-Lan Liou and Noel A. Brennan, "Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling", *J. Opt. Soc. Am.*, **14**, pp.1684-1695 (1997).
- [3] Radhakrishnan, H & W. Neil Charman, "Age-Related changes in ocular aberrations with accommodation", *Journal of Vision*, **7**, pp. 1–21 (2007).
- [4] Anurag Sharma, D. Vizia Kumar, and A. K. Ghatak, "Tracing rays through graded-index media: a new method", *Appl. Opt.* **21**, pp. 984-987 (1982).
- [5] Atchison, "D. A. and Smith, G. Continuous gradient index and shell models of the human lens," *Vision Res.* **35**, pp. 2529-2538 (1995).
- [6] Jones, C. E., Atchison, D. A., Meder, R., & Pope, J. M. "Refractive index distribution and optical properties of the isolated human lens using magnetic resonance imaging (MRI)", *Vision Res.* **45**, pp. 2352-2366 (2005).
- [7] Pierscionek, B. K. "In vitro alteration of human lens curvatures by radial stretchin", *Experimental Eye Research*, **57**, pp. 629–637 (1993).
- [8] Kelly, J. E., Mihashi, T., & Howland, H. C, "Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye," *Journal of Vision*, **4**, pp. 262-271, (2004).
- [9] José Antonio Díaz, Carles Pizarro and Josep Arasa, "Single dispersive gradient-index profile for the aging human lens," *J. Opt. Soc. Am.* **25**, pp. 250-261 (2008).
- [10] José Antonio Díaz, "ABCD matrix of the human lens gradient-index profile: applicability of the calculation methods", *Applied Optics*, **47**, pp. 195-205 (2008).
- [11] P. J. SANDS, "Third-Order Aberrations of Inhomogeneous Lenses", *J. Opt. Soc. Am.* **60**, pp. 1436-1443 (1970).
- [12] Ruben L. P, "Aberrations Arising from Decentrations an Tilts," *J. Opt. Soc. Am.*, **54**, pp.45-46 (1964).
- [13] George Smith and David A. Atchison, "The gradient index and spherical aberration of the lens of the human eye," *Oph. Physiol. Opt.* **21**, pp. 317-326 (2001).
- [14] Antonio Guirao, Manuel Redondo, and Pablo Artal, "Optical aberrations of the human cornea as a function of age," *J. Opt. Soc. Am.* **17**, pp. 1697-1702 (2000).