

Estudio paraxial con la edad de un modelo de ojo emétrope desacomodado con cristalino GRIN

José A. Díaz¹ *, José Fernández-Dorado², Josep Arasa³ y Carles Pizarro³

¹ *Departamento de Óptica. Universidad de Granada. Edificio Mecenaz. 18071-Granada*

² *SnellOptics, Prat de la Riba, 35. 08222-Terrassa.*

³ *CD6-Universidad Politécnica de Catalunya. Rambla de San Nebridi,10. 08222-Terrassa*

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

1. Introducción

El ojo humano es un sistema óptico formado por dos elementos convergentes, córnea y cristalino, con un diafragma de apertura en contacto con la primera superficie del segundo, y con un detector que es la retina. Como órgano perteneciente a un organismo que crece a largo de su vida, parece adecuado estudiar la formación de imágenes por este sistema a medida que los parámetros ópticos que lo definen cambian con la edad. Centrándonos en el periodo que abarca la vida media de una persona adulta, entre los 20 y los 70 años, existen diversos estudios biométricos publicados que han proporcionado la variación de los parámetros que definen el ojo humano desde el punto de vista óptico[1, 2, 3]. Amén de las aberraciones oculares y su variación con la edad, como han puesto de manifiesto numerosos estudios[4, 5, 6], parece también adecuado el estudio desde el punto de vista paraxial de la formación de imágenes retinianas, estudiando la variación de los elementos cardinales de un modelo esquemático de ojo representativo de una población media emétrope.

Diferentes modelos esquemáticos de ojo se ha publicado en un intento de modelizar la calidad de imagen retiniana[7, 8]. Dichos modelos presentan la ventaja de servir para la simulación de diferentes técnicas optométricas y oftálmicas. Puesto que la estructura óptica del cristalino es de tipo gradiente de índice (GRIN), y además varía tanto la geometría de sus superficies como la distribución del índice[9], sólo recientemente se ha publicado un modelo de ojo que recoge estas propiedades y proporciona, con buena bondad, la calidad de imagen retiniana y su evolución con la edad para sujetos emétopes desacomodados[10]. Es más, este modelo es pionero en modelizar un cristalino con un único perfil GRIN, que también varía con la edad, aunque con ciertas discrepancias respecto a las medidas experimentales recientemente publicadas[9], y que establecen un núcleo central de índice homogéneo que se expande con la edad, produciéndose la variación del índice de refracción en una región cada vez más pequeña en espesor en la zona periférica del cristalino.

Cuando los sistemas ópticos contienen medios con índices homogéneos, el cálculo de los elementos cardinales es muy simple mediante la aplicación de métodos matriciales establecidos por la Óptica Geométrica[11, 12]. De manera que un sistema óptico está caracterizado en el régimen paraxial por la matriz ABCD, de la cual pueden extraerse sus elementos cardinales. Pero además puede emplearse para calcular en el régimen paraxial, la propagación de luz coherente a través de la integral de difracción en dicho marco de aproximación[13]. Cuando uno de los medios del sistema presenta un gradiente de índice, como en el caso del cristalino en el ojo humano, podría parecer que la solución, incluso en el régimen paraxial vendría dada por la resolución numérica de la trayectoria de los rayos a través de dicho sistema. Sin embargo, existen estudios que demuestran que es posible, dentro de la aproximación paraxial, obtener la matriz ABCD que caracteriza el medio GRIN del cristalino[14, 15], y así, aplicar la óptica matricial para obtener los elementos cardinales del modelo de ojo esquemático[14, 16].

* e-mail: jadiaz@ugr.es

Por tanto, el objetivo de este estudio es obtener la variación de los elementos cardinales de un modelo esquemático de ojo con cristalino GRIN, desacomodado, y representativo de un sujeto adulto emétrope cuyos parámetros oculares varían con la edad en el rango entre 20 y 65 años, y compararlo con los resultados de trabajos previos[17, 18].

2. Métodos

Como ya sabemos, dada la matriz ABCD de un sistema óptico en el régimen paraxial, la potencia objeto e imagen en dioptrías (D) (si los parámetros oculares están en mm), la posición los puntos principales y puntos nodales, con referencia al vértice de la primera superficie, V, y de la última, V', vienen determinadas por las expresiones:

$$\begin{aligned} \overline{V'H'} &= \frac{1-A}{C} & ; & & \overline{HV} &= \frac{D}{C}(A-1) - B \\ \overline{V'N'} &= \frac{1-D}{C} & ; & & \overline{HN} &= \frac{A}{C}(D-1) - B \\ \phi'(D) &= -\frac{1000 \times n_{vitreo}}{C} & ; & & \phi(D) &= -\frac{1000 \times \text{Det}(\mathbf{M})}{C} \end{aligned} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que el modelo esquemático de ojo emétrope desacomodado con la edad, y con cristalino GRIN viene dado por el trabajo de Díaz *et al*[10], la matriz ABCD, \mathbf{M} , del modelo esquemático de ojo viene dado por el siguiente producto de matrices:

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}_{L2} \cdot \mathbf{T}_{GRIN} \cdot \mathbf{R}_{L1} \cdot \mathbf{T}_{C2L1} \cdot \mathbf{M}_{C2} \cdot \mathbf{T}_{C1C2} \cdot \mathbf{M}_{C1} \quad (2)$$

donde las matrices, \mathbf{R} y \mathbf{T} , son las matrices de refracción y de transferencia respectivamente. La matriz de transferencia a través del perfil GRIN del cristalino, puede calcularse a partir de[14]:

$$\mathbf{T}_{GRIN} = \begin{pmatrix} 1 + \beta d^2 & \frac{d}{2} \left(1 + \frac{N_o(0)}{N_o(d)} + \beta d^2 \right) \\ 2\beta d & \frac{N_o(0)}{N_o(d)} + \beta d^2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

en la que:

$$\beta = \frac{\int_0^d N_1(z) dz}{dN_o(d) - 2 \int_0^d N_1(z) z^2 dz}. \quad (4)$$

siendo d , el grosor del cristalino para cada edad, $N_o(d) = N_o(0)$, ya que en la cara anterior y posterior del cristalino el índice de refracción es el mismo por definición, y $N_1(z)$ es el coeficiente en $x^2 + y^2$ del perfil GRIN[10].

3. Resultados y discusión

En la Figura 1, se muestran la posición de los puntos cardinales del modelo esquemático desacomodado empleado a medida que la edad del sujeto emétrope aumenta de 20 a 65 años. Los resultados se muestran para tres longitudes de onda: la de máxima sensibilidad del sistema visual en el nivel fotópico de luminancia, 555 nm, y las dos extremas del espectro visible, 400 y 700 nm. Como puede apreciarse, la potencia del ojo se mantiene constante con la edad, entorno a 61 D, tal y como predice el modelo esquemático, y en completo acuerdo con la paradoja del cristalino[19]. Por otra parte y como resultado general, la posición de los puntos cardinales cambia entorno a entre 20 y 60 μm con la longitud de onda, lo que en el caso de la posición de los puntos principales justifica la aparición de la aberración cromática longitudinal.

Es más, puede observarse como, mientras la posición del punto principal objeto, H, mínimamente se desplaza con la edad hacia la cara anterior del cristalino, sin embargo, el punto principal imagen,

H' , sí se desplaza significativamente hacia la cara posterior de la córnea. En consecuencia, eso daría como resultado que el ojo perdería potencia con la edad, y de aquí el papel principal que el cristalino juega para la formación de imágenes en la retina con la edad. Similarmente le ocurren a los puntos nodales. En general, los datos sobre la localización de los puntos cardinales, H , H' , N , N' , son coherentes con valores de estudios previos[17, 18]. Sin embargo, las tendencias son diferentes debidas principalmente a la utilización de índices de refracción homogéneos, o perfiles GRIN no adecuados para describir el índice de refracción del cristalino.

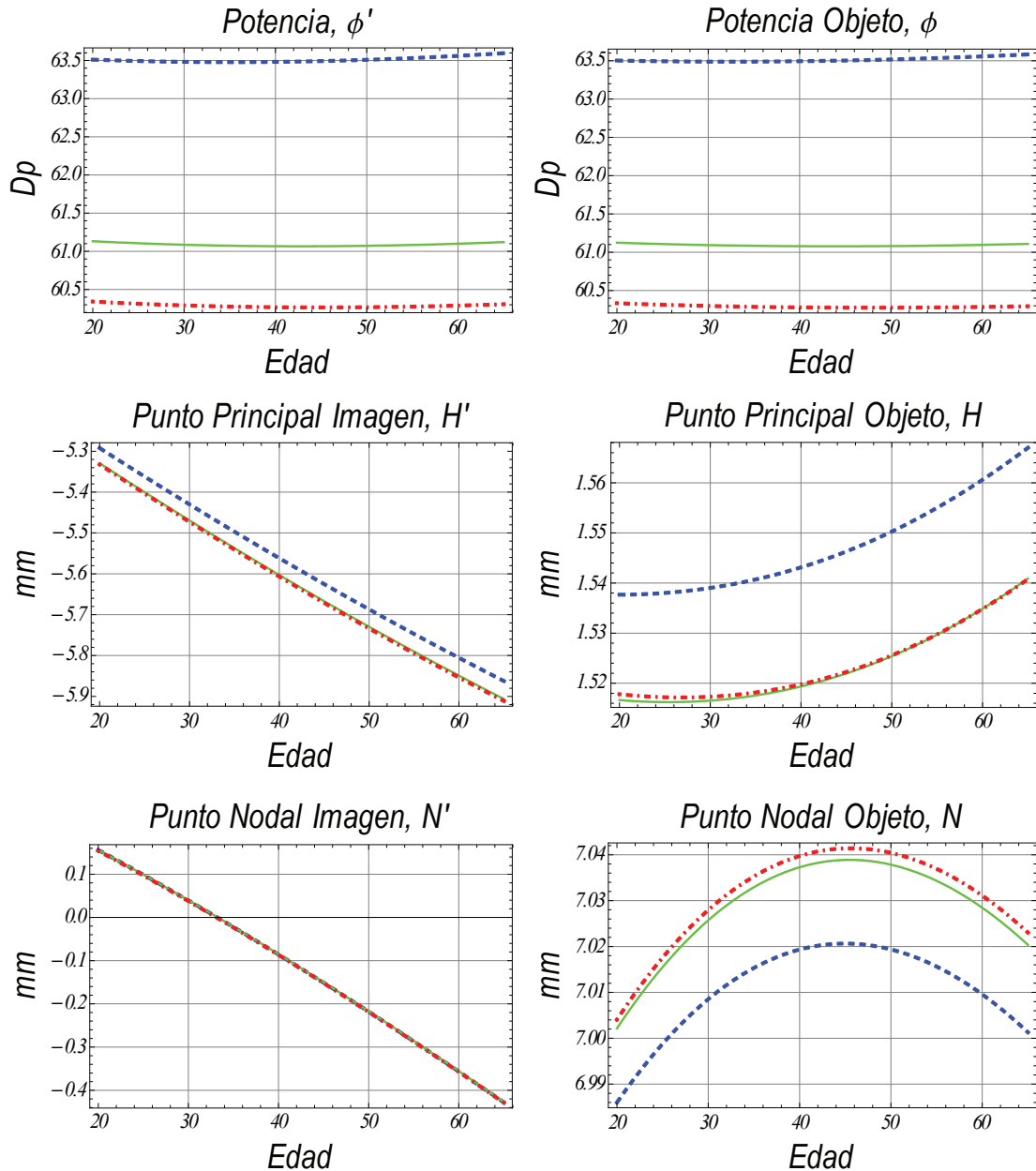


Figura 1: Posición de los puntos cardinales H , H' , N y N' , y potencia objeto e imagen para las longitudes de onda: 500nm (línea continua), 400 nm (línea discontinua) y 700 nm (línea discontinua con puntos). H' y N están referidos a la cara posterior del cristalino, mientras que H y N lo están con respecto a la cara anterior de la córnea.

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] M. Dubbleman, V. A. D. P. Sicam, and G. L. van der Heijde, “The shape of the anterior and posterior surface of the aging human cornea,” *Vis.Res.* **46**, p. 993 (2006).
- [2] M. Dubbleman and G. L. van der Heijde, “The shape of the human lens: curvature, equivalent refractive index and the lens paradox,” *Vis.Res.* **41**, p. 1867 (2001).
- [3] D. A. Atchison, E. L. Markwell, S. Kasthurirangan, J. M. Pope, G. Smith and P. G. Swann, “Age-related changes in optical and biometric characteristics of emmetropic eyes,” *J. of Vis.* **8**(4):29, p. 1 (2008).
- [4] A. Guirao, C. González, M. Redondo, E. Geraghty, N. E. S. Norby, and P. Artal, “Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population,” *Inves. Ophthalm. Vis. Sci.* **40**, p. 210 (1999).
- [5] J. S. McLellan, S. Marcos, and S. A. Burns, “Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye,” *Inves. Ophthalm. Vis. Sci.* **42**, p. 1390 (2001).
- [6] H. Radhakrishnan and W. N. Charman, “Age-Related changes in ocular aberrations with accommodation,” *J. of Vis.* **7**(7):11, p. 1 (2007).
- [7] I. Escudero-Sanz and R. Navarro, “Off-axis aberrations of a wide-angle schematic eye,” *J. Opt. Soc. Am.* **16**, p. 1881 (1999).
- [8] H. Liou and N. A. Brennan, “Anatomically accurate, finite model eye for optical modeling,” *J. Opt. Soc. Am. A* **14**(8), p. 1684 (1997).
- [9] C. Jones, D. A. Atchison, R. Meder, and J. Pope, “Refractive index distribution and optical properties of the isolated human lens measured using magnetic resonance imaging (MRI),” *Vis. Res.* **45**, p. 2352 (2005).
- [10] J.A. Díaz, C. Pizarro and J. Arasa, “A single dispersive GRIN profile for the aging human eye,” *J. Opt. Soc. Am. A* **25**(1), p. 250 (2008).
- [11] K. Halbach, “Matrix representation of gaussian optics,” *Am. J. Phys.* **3**, p. 90 (1964).
- [12] A. Gerrard and J. Burch, *Introduction to Matrix Methods in Optics* (Dover Publishing Inc., 1975).
- [13] S. A. Collins, “Lens-system diffraction integral written in terms of matrix optics,” *J. Opt. Soc. Am.* **60**(9), p. 1168 (1970).
- [14] J. A. Díaz, “ABCD matrix of the human lens gradient-index profile: applicability of the calculation methods,” *Appl. Opt.* **47**, p. 195 (2008).
- [15] M. V. Pérez, C. Bao, M. T. Flores-Arias, M. Rama, and C. Gómez-Reino, “Gradient parameter and axial and field rays in the gradient-index crystalline lens model,” *J. Opt. A: Pure & Appl.* **5**, p. S293 (2003).
- [16] M. V. Pérez, C. Bao, M. T. Flores-Arias, M. A. Rama, and C. Gómez-Reino, “Description of gradient-index crystalline lens by a first order optical system,” *J. Opt. A: Pure & Appl.* **7**, p. 103 (2005).
- [17] J. F. Koretz, and C. A. Cook, “Aging of the optics of the human eye: lens refraction models and principal planes location,” *Optom. Vis. Sci.* **78**, p. 396 (2002).
- [18] D. A. Atchison, “Age-related paraxial schematic emmetropic eyes,” *Ophthalm. Physiol. Opt.* **29**, p. 58 (2009).
- [19] B. A. Moffat, D. A. Atchison, and J. Pope, “Explanation of the lens paradox,” *Optom. Vis. Sci.* **79**, p. 148 (2002).