

# MODELOS GEOMÉTRICOS PARA LA EVALUACIÓN REFRACTIVA DE LA CÓRNEA

Julián Espinosa Tomás<sup>(1)</sup>, Jessica Rouarch<sup>(1)</sup>, Jorge Pérez Rodríguez<sup>(1)</sup>, David Mas Candela<sup>(1)</sup>, Consuelo Hernández Poveda<sup>(1)</sup>, Carlos Illueca Contri<sup>(1)</sup>

Dpto. Óptica. Universidad de Alicante<sup>(1)</sup>

## 1. Introducción

La córnea y el cristalino son los principales elementos refractivos y contribuyentes a las aberraciones en el ojo humano. Hoy en día, se utilizan dos métodos para evaluar el paso de la luz a través del ojo completo. Uno basado en el trazado exacto de rayos y otro basado en el cálculo de la integral de Fresnel. El primero se utiliza para evaluar los polinomios de Zernike del frente de onda en el plano de la pupila salida. El segundo es particularmente útil para calcular el paso de la luz a través de diferentes elementos refractivos implantados en el ojo, y para calcular su respuesta impulsional tridimensional (PSF) y su función de transferencia modulada (MTF). En ambos casos, la evaluación de las transmitancias de la córnea y del cristalino, que puede realizarse a partir del camino óptico de la luz que los atraviesa, es fundamental a la hora de determinar la calidad óptica del ojo humano.

## 2. Método

El camino óptico puede calcularse de forma rápida y precisa mediante el cálculo de un trazado exacto de rayos [1], sin embargo, la deflexión de los rayos produce un muestreo no uniforme debido a la redistribución que sufren las muestras en el plano de salida. Dependiendo del método de propagación que se utilice, será necesario remuestrear el frente de onda en el plano de salida provocando que este método no sea eficiente en lo referente a cantidad de tiempo y recursos informáticos necesarios.

Un método más simple considera que las diferencias de grosor del medio óptico son responsables de las variaciones de camino óptico introducidas en el frente de onda [2] sin tener en cuenta la deflexión de los rayos, ya que se asume incidencia paraxial y elementos ópticos delgados.

Consideramos un tercer método entre ambas técnicas de cálculo. Al igual que en [2], calculamos una función grosor del elemento bajo estudio, pero lo corregimos mediante la refracción del rayo en cada punto obteniendo resultados similares al método exacto. Además la matriz de salida está uniformemente muestreada, por tanto este método corregido es computacionalmente más eficiente que el exacto.

Además, la córnea puede ser analizada desde dos perspectivas diferentes. Por un lado se asume que es un dioptrio que separa el aire del humor acuoso con un índice queratómétrico equivalente. Por otro lado, puede modelarse como una lente convexo-cóncava formada por una superficie anterior real y una superficie posterior teórica descrita, en función de la edad, por los parámetros estimados en [3].

### 3. Resultados

Hemos calculado las aberraciones corneales y el camino óptico de diez córneas humanas con el fin de analizar los métodos y geometrías propuestas. En la figura 1, comparamos las diferencias de camino óptico (en longitudes de onda) para una y dos superficies utilizando el trazado exacto de rayos. Como la estructura corneal consta de dos superficies, consideramos esta configuración como la más aproximada a la córnea real y la utilizamos para evaluar las diferencias con los otros métodos. También representamos la media radial de las diferencias de caminos ópticos calculada utilizando los tres métodos anteriores respecto a la altura de incidencia para la córnea formada por una sola superficie (1s) y dos superficies (2s). Nótese que el método simplificado para dos caras es el que mejor se aproxima al camino óptico exacto.

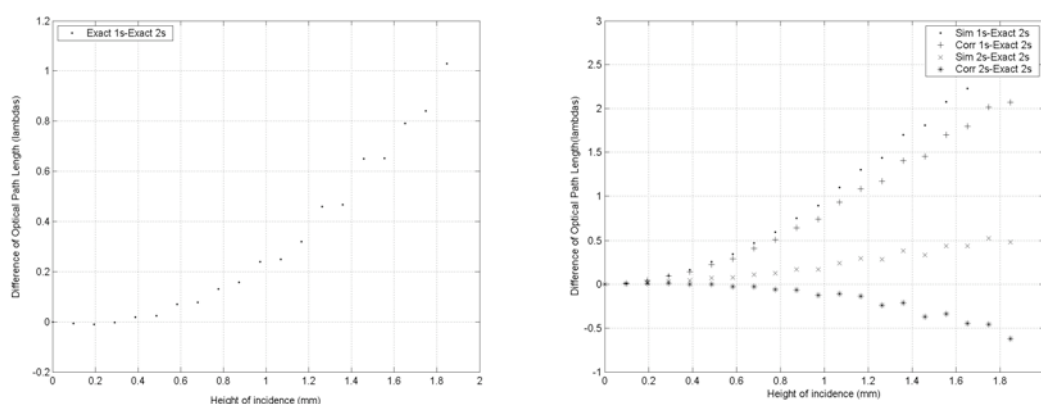


Figura 1. Diferencias medias de caminos ópticos (en longitudes de onda) frente a altura de incidencia para dos geometrías corneales.

Con tal de analizar los efectos en los cálculos de aberraciones realizamos un análisis de los coeficientes de Zernike del frente de onda en el plano de salida. En la figura 2 se ilustra la variación relativa de la media radial de los coeficientes de Zernike con respecto a los valores exactos. Utilizar el método simplificado en el cálculo del camino óptico describe erróneamente el cuarto (desenfoque) y el duodécimo (esférica) coeficiente. Nótese que el método que mejor se ajusta al caso exacto con dos superficies es el método corregido, también aplicado a la configuración con dos superficies.

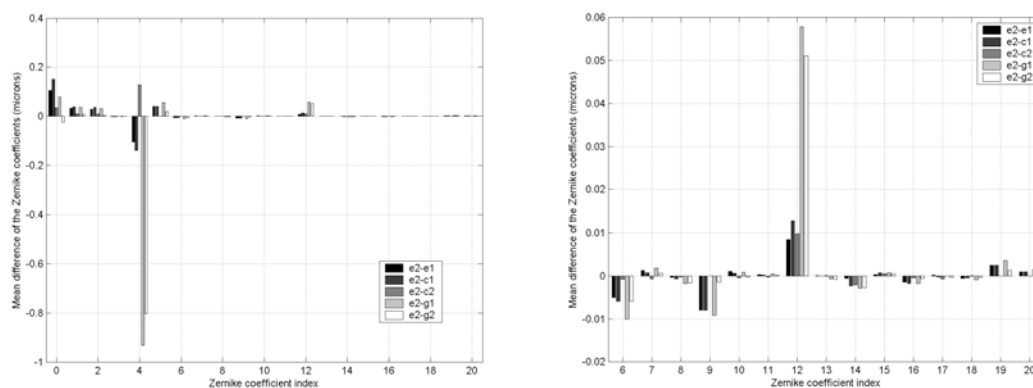


Figura 2. Diferencias del valor medio de los coeficientes de Zernike (en micras) del frente de onda de diez córneas humanas, calculados utilizando los tres métodos propuestos y dos diferentes configuraciones corneales, con respecto a los coeficientes de Zernike calculados considerando las córneas como lentes y utilizando el método exacto

Cabe destacar que, aparte de la aberración esférica, no hay grandes diferencias entre los distintos métodos. Nótese que una configuración corneal de dos superficies calculada utilizando el método simplificado es también muy similar al exacto, debido al hecho de que la RMS ignora el signo de los coeficientes. Como sucedía con la evaluación del camino óptico, el criterio de la RMS, no es lo suficientemente preciso para diferenciar entre las aproximaciones analizadas

	Exacto 1 superficie	Exacto 2 superficies	Corregido 1 superficie	Corregido 2 superficies	Simplificado 1 superficie	Simplificado 2 superficies
RMS ( $\mu\text{m}$ )	0.9692	1.0861	0.9310	1.0607	1.3634	1.3727

Tabla 1. Valores cuadráticos medios de los coeficientes de Zernike.

Hasta ahora, hemos calculado las desviaciones medias respecto al caso exacto. En la figura 3 representamos la variación de la razón de Strehl, para los casos simplificado y corregido con diferentes radios pupilares, con respecto a la distancia propagada  $z$  desde el ápex corneal, para una córnea en particular. Podemos apreciar la distancia de enfoque, donde la razón de Strehl alcanza su máximo. Es destacable que el caso simplificado no se vea afectado por la variación en la apertura. Recordemos que este caso era el que peor evaluaba el coeficiente de la aberración esférica. En el caso corregido, la aberración esférica positiva provoca que el foco de la córnea se más corto cuanto mayor es la apertura.

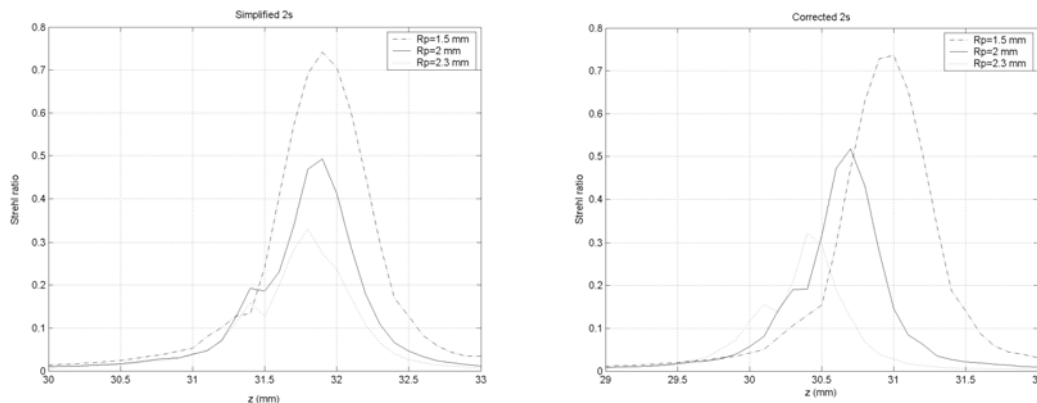


Figura 3. Variación de la razón de Strehl para los casos simplificado y corregido con diferentes radios pupilares

Con estos resultados, queda claro que el método corregido es apropiado para calcular la transmitancia corneal, y es una alternativa real al trazado clásico de rayos [4]. El método simplificado, aunque es muy común en óptica difractiva, no es lo bastante aproximado para estos elementos de alta potencia.

## 5. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto: FIS2005-05053.

## Bibliografía

[1] Born, M., and Wolf, E., *Principles of Optics*. Pergamon Press, Oxford, 1987.

[2] Goodman, J. W., *Introduction to Fourier Optics*. Pergamon Press, Oxford, 1987

[3] Dubbelman et al., *Vision Research*, **46** (993-1001), 2006.

[4] Espinosa, J. et al., *Optik*, In Press, 2006.