

INTRODUCCIÓN A LA ABERROMETRÍA & REVISIÓN DE ÓPTICA VISUAL

AUTOR

Thomas Salmon: Northeastern State University, EEUU

PAR REVISOR

Scott Steinman: Southern California College of Optometry, EEUU

ESTE CAPÍTULO INCLUIRÁ UNA REVISIÓN DE :

- Aberrometría
- Óptica visual
- Conceptos básicos de aberrometría
- Aberraciones de alto orden
- Precisión de los aberrómetros
- Balanceo de las aberraciones en el ojo humano
- Corrección óptica adaptable al ojo
- Relación entre RMS, coeficientes de Zernike y visión

INTRODUCCIÓN A LA ABERROMETRÍA

“Cercano a la vida misma, el regalo máspreciado de Dios, es el sentido de la visión” Presidente Frank Devlyn
Como optómetras proesionales, una de nuestras misiones en la vida es proteger, corregir y mejorar la visión de nuestros pacientes. ¿Cuáles son algunas de las causas de la baja visión?

- Enfermedades oculares como glaucoma o catarata
- Enfermedads sistémicas como tumores cerebrales que comprimen la via visual
- Traumas oculares como un trauma contuso durante un juego de basketball.
- Condiciones visuales como la ambliopía.
- Defectos refractivos

INTRODUCCIÓN A LA ABERROMETRÍA (CONT.)

La causa más frecuente de la baja visión son los defectos refractivos no corregidos, por lo tanto una de las cosas más importantes que hacemos es evaluar la calidad óptica. El conocimiento de la óptica hace que los profesionales optómetras sean los mejores calificados para solucionar las necesidades visuales de sus pacientes. Hablemos un poco de uno de los más recientes avances en el campo de la óptica visual- la aberrometría.

P. ¿Qué es la aberrometría?

R. La aberrometría también se conoce con el nombre de tecnología de frente de onda. Es una técnica empleada para medir los defectos refractivos con más detalles de los que se perciben con un método clínico de refracción tradicional como la refracción subjetiva, empleando un foróptero o autorefracción.

El frente de onda se define como una superficie en la que se propaga una onda asociando todos los puntos que tienen la misma fase en la onda.

La aberrometría tiene mayores alcances al medir los defectos refractivos. Mide la forma de un frente de onda de luz que pasa a través de los medios refringentes del ojo. Al analizar la forma de los frentes de onda, se puede determinar la magnitud y tipo de defecto refractivo presente en el ojo, incluyendo:

- Defectos de enfoque esféricos (miopía, hipermetropía)
- Defectos astigmáticos
- Aberraciones de alto orden (coma, aberraciones esféricas y otras)

REVISIÓN DE ÓPTICA VISUAL

SIMILITUDES ENTRE EL OJO Y UNA CÁMARA

El ojo generalmente es comparado con una cámara. Ambos son instrumentos ópticos que han sido diseñados para formar imágenes. Otras similitudes se mencionan en la tabla 1-1.

OJOS ESQUEMÁTICOS

La ilustración de la cámara puede ayudarnos a entender el ojo, asimismo los ojos esquemáticos cumplen la misma función. Algunos ejemplos son:

- Ojo esquemático de Gullstrand No. 1. Dos superficies corneales, cuatro lentes, esféricos, superficies rotacionalmente simétricas
- Ojo reducido de Gullstrand-Emsley. Una superficie corneal, dos lentes, esféricos, superficies rotacionalmente simétricas. (ver figura 1-1)
- Ojo de Indiana. Una superficie corneal asférica con pupila. Ver el artículo en la siguiente página web: (<http://research.opt.indiana.edu/Library/INEye/IndianaEye.html>) or in Thibos LN, Ye M, Zhang X, Bradley A. Spherical Aberration of the Reduced Schematic Eye with Elliptical Refracting Surface. Optom Vis Sci 1997; 74:458-556

Tabla 1-1: Similitudes entre el ojo y una cámara

OJO	CÁMARA	FUNCIÓN
Córnea+lente	Elementos de los lentes	Focalizar la luz, generar una imagen
Retina	Película o chip CCD (cámara digital)	Recibir la imagen, convertir los fotones en una señal eléctrica
Pupila	Apertura	Controlar el brillo de la imagen, profundidad de foco, difracción, aberraciones
Capa del EPR	Interior oscuro	Reducir la dispersión interna de la luz
Acomodación	Mecanismo de auto-enfoque	Enfoque a diferentes distancias

REVISIÓN DE ÓPTICA VISUAL (CONTINUACIÓN.)

P. ¿Cuál es la definición de la entrada pupilar?

R. Es la imagen de la pupila real que se forma en la córnea. Es decir, que si la pupila anatómica o el iris es el objeto, después de ser refractado por la córnea, la entrada pupilar es su imagen. Cuando vemos el ojo de una persona y vemos su pupila o el iris, no estamos viendo la pupila real sino una imagen de esa pupila, que es la entrada pupilar. La entrada pupilar es particularmente importante en la aberrometría porque es el plano de referencia normal para medir las aberraciones del ojo.

El aberrómetro de sistema de análisis oftálmico completo (COAS) le permite especificar las aberraciones en un lente o en un plano corneal, pero, la medida básica normalmente se toma con respecto al plano de entrada pupilar.

EJES DEL OJO

En óptica visual se aprendió acerca de varios ejes teóricos del ojo y de ángulos importantes entre ambos ejes. Para la aberrometría, el eje más importante del ojo es el eje visual.

El eje visual se define como el segmento lineal que conecta el punto de fijación con el centro de la entrada pupilar. Si un rayo entra al ojo a través del eje visual, continuará su curso desde la pupila hasta la fovea (Fig 1-1). El eje visual es importante en la aberrometría, porque las medidas de las aberraciones del ojo deben centrarse en el eje visual.

El capítulo 10 habla de consideraciones neurales y de la zona efectiva de la retina, también habla sobre el efecto Stiles-Crawford. Esto será estudiado en mayor profundidad más adelante en el curso cuando se hable de visión espacial.

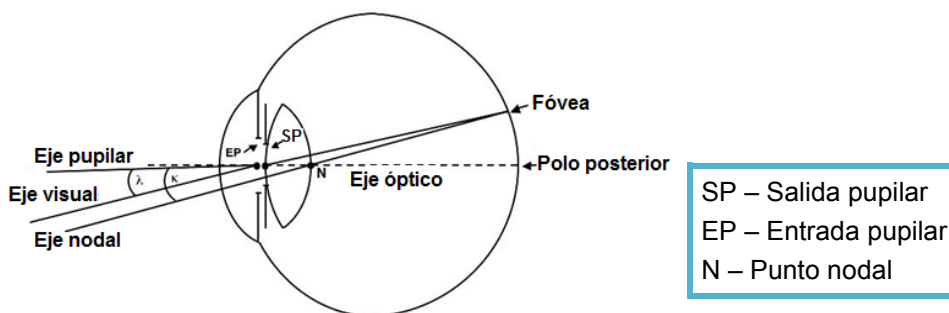


Figura 1-1: Figura basada en el ojo reducido de Gullstrand-Emsley que muestra algunos de los ejes mas importantes y sus ángulos, asimismo, la localización de la entrada y salida pupilar.

Con respecto a los métodos para reportar las aberraciones ópticas de los ojos el ANSI, (American National Standard Institute) resumió en el 2004 muchos de los principios básicos de la aberrometría y estandarizó los sistemas para medir y registrar las aberraciones.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA

- ¿Qué son las aberraciones de alto orden?
 - Defectos refractivos
- ¿Qué son los aberrómetros?
 - Super auto-refractómetros
- ¿Qué son los polinomios de Zernike?
 - Una forma de registrar un defecto refractivo
- ¿Quién necesita de la aberrometría?
 - Pacientes con baja visión causada por sus aberraciones de alto orden

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

¿QUÉ SON LAS ABERRACIONES DE ALTO ORDEN?	<ul style="list-style-type: none"> • Aberraciones de alto orden = defectos refractivos • Los defectos refractivos incluyen la miopía, hipermetropía, astigmatismo y otros • Defectos refractivos de bajo orden (aberraciones): Esféricas, astigmatismo • Defectos refractivos de alto orden (aberraciones): Los otros • Los aberrómetros miden las aberraciones monocromáticas • La aberración cromática es otro tema distinto • Las aberraciones de Seidel son para ojos esquemáticos, no para el ojo humano
EL TAMAÑO DE LA PUPILA ES DETERMINANTE	<ul style="list-style-type: none"> • Las aberraciones generan mayores dificultades en pupilas de mayor diámetro • El mayor beneficio al corregir las aberraciones de alto orden se refleja en pacientes con diámetro pupilar grande • Una forma de reducir las molestias causadas por las aberraciones: disminuir el diámetro pupilar • Visión supernormal = visión con una óptica perfecta (libre de aberraciones) • La mejor agudeza visual obtenida es de 20/8 o 6/2.4!
¿QUÉ SON LOS ABERRÓMETROS?	<ul style="list-style-type: none"> • También llamados sensores de frente de onda • Son como super-autorefractómetros. Miden la esfera, el cilindro y las aberraciones de alto orden
¿QUÉ MIDEN LOS ABERRÓMETROS?	<ul style="list-style-type: none"> • Distorsiones en el frente de onda de un rayo de luz que ha pasado a través de los medios ópticos del ojo • Las aberraciones (defectos refractivos) distorsionan los frentes de onda que pasan a través de los medios ópticos del ojo. • Miden la forma del frente de onda con el fin de determinar las aberraciones en el ojo • Los aberrómetros de Shack-Hartmann (los más populares) miden la forma de un frente de onda que emite el ojo después de ser reflejado por la retina
¿CÓMO SE REGISTRAN LAS ABERRACIONES?	<ul style="list-style-type: none"> • Los aberrómetros miden los frentes de onda • Los frentes de onda son distorsionados por los defectos refractivos del ojo • La mayoría de ojos tienen una mezcla de múltiples aberraciones que generan frentes de onda irregulares o distorsionados (ver figura 1-2)

P. ¿Cómo pueden identificarse las aberraciones específicas en el ojo que generan distorsiones de los frentes de onda?

R. Analizando el frente de onda con los polinomios de Zernike

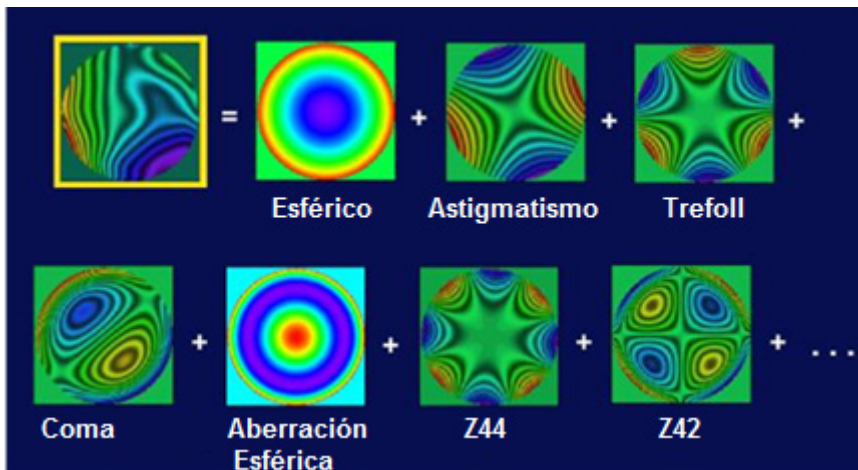


Figura 1-2: El frente de onda en la parte superior izquierda contiene las siguientes aberraciones

- Polinomios de Zernike- El método estandarizado moderno para reportar las aberraciones del ojo humano (ANSI Z-80.28-2004)
- Un sistema matemático- clasifica aberraciones específicas (**Modelos de Zernike**), Según su jerarquía (Ver figura 1-3)

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

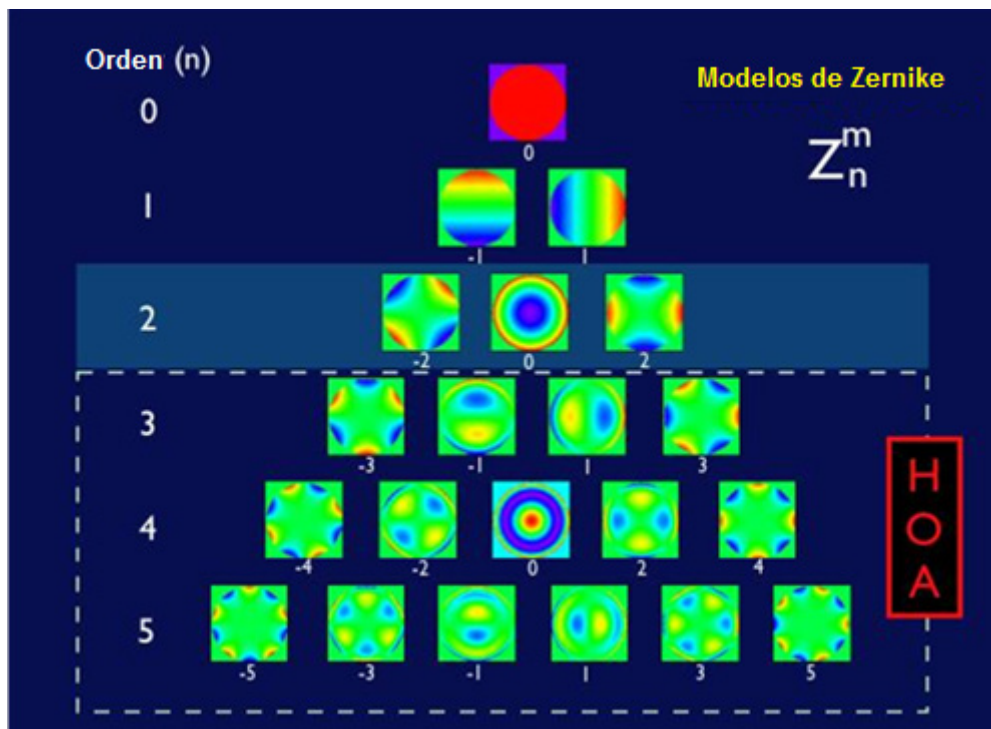


Figura 1-3: Modelos de Zernike organizados de manera piramidal. Cada modelo es una aberración. HOA, se refiere a alteraciones de alto orden

Tabla de periódica de los modelos de Zernike- una pirámide como se muestra en la figura 1.3

Organizado en el orden de Zernike (Columnas). Solo se muestran los primeros 5 en el orden en la figura 1.3

Los modelos de Zernike en cada fila están numerados

Los modelos específicos se identifican mediante un subíndice (n) y un índice (m) Z_n^m

Donde n = orden numérico; m = número del modelo

Los modelos de segundo orden incluyen esferas Z_2^0 , astigmatismo Z_2^2 y Z_2^{-2} .

Los modelos de tercer orden y los modelos subsiguientes se conocen como aberraciones de alto orden (HOA)

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

Figura 1-4 Muestra un ejemplo del frente de onda de un ojo con su prescripción convencional y la prescripción de Zernike (Rx)

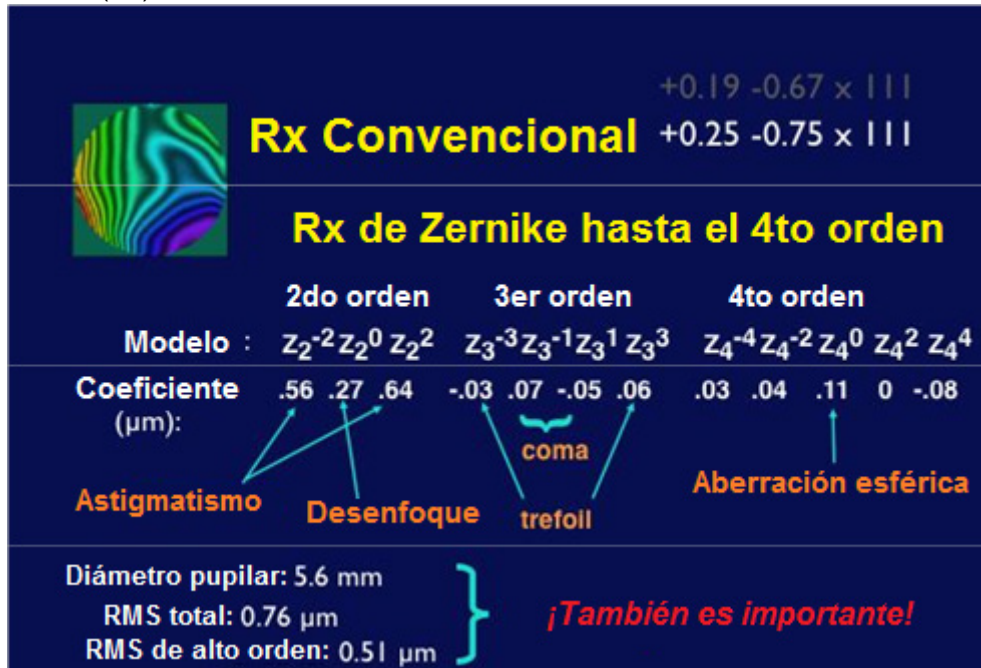


Figura 1-4: Frente de onda e información que describe los defectos refractivos de un ojo.

El tamaño pupilar es una parte determinante de la información de Zernike. Los coeficientes de Zernike aplican solo para un tamaño pupilar. Estos cambiarán si el tamaño pupilar cambia.

La unidad de medida para los coeficientes de Zernike son los micrómetros (μm).

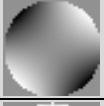

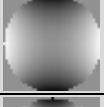
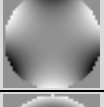
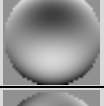
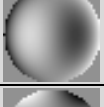
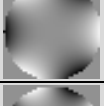
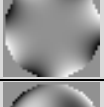
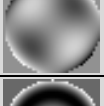
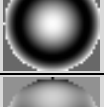
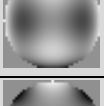

El promedio total de raíz cuadrada (RMS) = Total de la magnitud de defectos refractivos del ojo (esfera, cilindro + alteraciones de alto orden)

Caso clínico

- Mujer de 35 años de edad, llega a consulta optométrica solicitando un examen visual exhaustivo
- Había sido operada con queratotomía radial (KR) en ambos ojos
- Reportaba sombras/ visión doble/ deslumbramiento, astenopia, dolores de cabeza, dificultad para leer, especialmente en la noches y al conducir de noche.
- La aberrometría reveló alteraciones de alto orden más altas de lo normal (no corregibles con lentes otálmicos) secundarias a la queratotomía radial
- Se le prescribió un agonista adrenérgico α -2 (Brimonidina) para reducir el tamaño pupilar.
- El paciente aun las usa un año después. La visión mejoró, ya no presentaba deslumbramiento ni dolores de cabeza.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

Tabla 1-2: Polinomios de Zernike del segundo al cuarto orden

ORDEN	MODELO DE ZERNIKE	NOMBRE	ECUACIÓN (POLAR)	MAPA TOPOGRÁFICO
2	Z_2^{-2}	Astigmatismo oblicuo	$\sqrt{6}\rho^2 \sin 2\theta$	
2	Z_2^0	Desenfoque esférico	$\sqrt{3}(2\rho^2 - 1)$	
2	Z_2^2	Astigmatismo con y contra la regla (WTR/ATR)	$\sqrt{6}\rho^2 \cos 2\theta$	
3	Z_3^{-3}	Trefoil Oblicuo	$\sqrt{8}\rho^3 \sin 3\theta$	
3	Z_3^{-1}	Coma vertical	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\sin\theta$	
3	Z_3^1	Coma horizontal	$\sqrt{8}(3\rho^3 - 2\rho)\cos\theta$	
3	Z_3^3	Trefoil horizontal	$\sqrt{8}\rho^3 \cos 3\theta$	
4	Z_4^{-4}	Cuadrafoil oblicuo	$\sqrt{10}\rho^4 \sin 4\theta$	
4	Z_4^{-2}	Astigmatismo oblicuo y de segundo orden	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\sin 2\theta$	
4	Z_4^0	Aberración esférica	$\sqrt{5}(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	
4	Z_4^2	Astigmatismo con y contra la regla (WTR/ATR) de segundo orden	$\sqrt{10}(4\rho^4 - 3\rho^2)\cos 2\theta$	
4	Z_4^4	Cuadrafoil	$\sqrt{10}\rho^4 \cos 4\theta$	

ATR = Astigmatismo contra la regla (Defecto de frente de onda más positivo a 180 grados)

WTR = Astigmatismo con la regla (defecto de frente de onda más positivo a 90 grados)

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

Tabla 1-3: Promedios de los coeficientes de Zernike \pm desviación estándar (μm) para datos agrupados (OD y OI combinados) para 4 diámetros pupilares. (Tomado de los estudios del Profesor Thomas Salmon, que serán publicados en el Journal de catarata y cirugía refractiva)

TÉRMINO DE ZERNIKE	6.0 MM	5.0 MM	4.0 MM	3.0 MM
Z_3^{-3}	0.106 ± 0.088	0.069 ± 0.056	0.040 ± 0.033	0.019 ± 0.016
Z_3^{-1}	0.143 ± 0.118	0.082 ± 0.069	0.045 ± 0.038	0.021 ± 0.018
Z_3^1	0.090 ± 0.076	0.056 ± 0.047	0.033 ± 0.027	0.015 ± 0.013
Z_3^3	0.081 ± 0.066	0.052 ± 0.043	0.030 ± 0.026	0.014 ± 0.013
Z_4^{-4}	0.038 ± 0.033	0.023 ± 0.020	0.012 ± 0.011	0.005 ± 0.004
Z_4^{-2}	0.027 ± 0.023	0.017 ± 0.015	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003
Z_4^0	0.128 ± 0.096	0.064 ± 0.049	0.028 ± 0.022	0.010 ± 0.008
Z_4^2	0.048 ± 0.039	0.026 ± 0.023	0.013 ± 0.013	0.005 ± 0.005
Z_4^4	0.043 ± 0.038	0.025 ± 0.022	0.013 ± 0.012	0.005 ± 0.005
Z_5^{-5}	0.025 ± 0.022	0.011 ± 0.010	0.004 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^{-3}	0.024 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^{-1}	0.028 ± 0.024	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001
Z_5^1	0.020 ± 0.018	0.009 ± 0.008	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_5^3	0.018 ± 0.016	0.008 ± 0.007	0.003 ± 0.002	0.001 ± 0.001
Z_5^5	0.023 ± 0.021	0.010 ± 0.009	0.003 ± 0.003	0.001 ± 0.001
Z_6^{-6}	0.019 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^{-4}	0.014 ± 0.014	0.005 ± 0.005	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
Z_6^{-2}	0.012 ± 0.011	0.004 ± 0.004	0.001 ± 0.001	0.000 ± 0.000
Z_6^0	0.024 ± 0.020	0.008 ± 0.007	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^2	0.016 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^4	0.017 ± 0.016	0.006 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000
Z_6^6	0.020 ± 0.018	0.007 ± 0.006	0.002 ± 0.002	0.000 ± 0.000

Para las aberraciones de 3er a 5to orden, $n=2,205$ para 6.0mm y $n=2,560$ para 5.0, 4.0, 3.0 mm

Para las aberraciones de 6to orden, $n = 1871$ para 6.0mm y $n = 2,008$ para 5.0, 4.0, 3.0mm.

CONCEPTOS BÁSICOS DE LA ABERROMETRÍA (CONT.)

Tabla 1-4: Promedios de los valores de RMS \pm desviación estándar (μm) para modelos polares y combinados de Zernike, el orden y el total de aberraciones de alto orden (orden 3-5) para cuatro diámetros pupilares. Agrupado de toda la información del OD y OI (Tomado de los estudios del Profesor Thomas Salmon, que serán publicados en el Journal de catarata y cirugía refractiva)

RMS PARA	6.0 MM	5.0 MM	4.0 MM	3.0 MM
MODELOS POLARES				
Z31	0.185 \pm 0.118	0.109 \pm 0.069	0.061 \pm 0.039	0.029 \pm 0.018
Z33	0.147 \pm 0.091	0.095 \pm 0.058	0.055 \pm 0.035	0.026 \pm 0.017
Z40	0.128 \pm 0.096	0.064 \pm 0.049	0.028 \pm 0.022	0.010 \pm 0.008
Z42	0.060 \pm 0.039	0.034 \pm 0.023	0.018 \pm 0.013	0.007 \pm 0.005
Z44	0.063 \pm 0.042	0.038 \pm 0.025	0.020 \pm 0.013	0.008 \pm 0.005
Z51	0.039 \pm 0.025	0.017 \pm 0.011	0.006 \pm 0.004	0.001 \pm 0.001
Z53	0.033 \pm 0.022	0.014 \pm 0.010	0.005 \pm 0.003	0.001 \pm 0.001
Z55	0.037 \pm 0.025	0.016 \pm 0.011	0.005 \pm 0.004	0.001 \pm 0.001
Z60	0.024 \pm 0.020	0.008 \pm 0.007	0.002 \pm 0.002	0.000 \pm 0.000
Z62	0.023 \pm 0.017	0.008 \pm 0.006	0.002 \pm 0.002	0.000 \pm 0.000
Z64	0.025 \pm 0.018	0.009 \pm 0.007	0.002 \pm 0.002	0.000 \pm 0.000
Z66	0.030 \pm 0.022	0.010 \pm 0.008	0.003 \pm 0.002	0.000 \pm 0.000
MODELOS COMBINADOS				
Tipo-coma (Z31+Z51)	0.192 \pm 0.115	0.112 \pm 0.068	0.062 \pm 0.039	0.029 \pm 0.018
Tipo- Sphaberr (Z40+Z60)	0.133 \pm 0.094	0.065 \pm 0.048	0.029 \pm 0.021	0.010 \pm 0.008
ORDEN DE ZERNIKE				
3	0.251 \pm 0.123	0.153 \pm 0.075	0.087 \pm 0.043	0.041 \pm 0.021
4	0.169 \pm 0.090	0.090 \pm 0.046	0.043 \pm 0.022	0.016 \pm 0.008
5	0.067 \pm 0.034	0.030 \pm 0.016	0.010 \pm 0.005	0.002 \pm 0.001
6	0.057 \pm 0.030	0.020 \pm 0.011	0.005 \pm 0.003	0.001 \pm 0.001
Total HO (Orden 3-6)	0.327 \pm 0.130	0.186 \pm 0.078	0.100 \pm 0.044	0.045 \pm 0.021

Para las aberraciones de 3er a 5to orden, $n=2,205$ para 6.0mm y $n=2,560$ para 5.0, 4.0, 3.0 mm

Para las aberraciones de 6to orden, $n = 1871$ para 6.0mm y $n = 2,008$ para 5.0, 4.0, 3.0mm.

ABERRACIONES DE ALTO ORDEN (HOA)

Tabla 1-5: Ejemplos de información de una clase de psicofísica y neurofisiología visual. La fila 1 muestra los coeficientes de Zernike para un ojo con HOA élite

CATEGORIA	PUPILA	HO RMS	Z (3, -3)	Z (3, -1)	Z (3, 1)	Z (3, 3)	Z (4, 0)
El mejor de la clase del año pasado	6.0	0.13	-0.07	0.02	-0.09	0.01	0.00
El 12avo mejor de la clase	5.0	0.11	-0.02	0.00	0.04	0.07	0.02
Promedio de la clase	5.0	0.21	0.00	-0.01	0.00	-0.01	0.04
Promedio absoluto de la clase	5.0	0.21	0.08	0.08	0.06	0.07	0.07
Normas absolutas OCO	5.0	0.19	0.07	0.08	0.06	0.05	0.06
Ojo LASIK (absoluto)	6.0	0.34	0.09	0.02	0.09	0.02	0.27
Radios LASIK		1.03	0.81	0.14	1.00	0.25	2.07

¿ Cómo computaría el promedio para cada aberración de alto orden de la clase?

- Sume el valor de cada sujeto
- Divida en el número de sujetos
- Para la mayoría de aberraciones, excepto las aberraciones esféricas Z(4,0), el promedio es cercano a 0.
¿Puede explicar por qué? Note que esto se cumplió para la clase también.
- ¿Por qué nos interesa saber el promedio de los valores absolutos?
- Note como el promedio de la clase se compara con las normas del Oklahoma College of Optometry (OCO) Publicadas en JCRS en Dic, 2006

ABERRACIONES DE ALTO ORDEN (HOA) (CONT.)

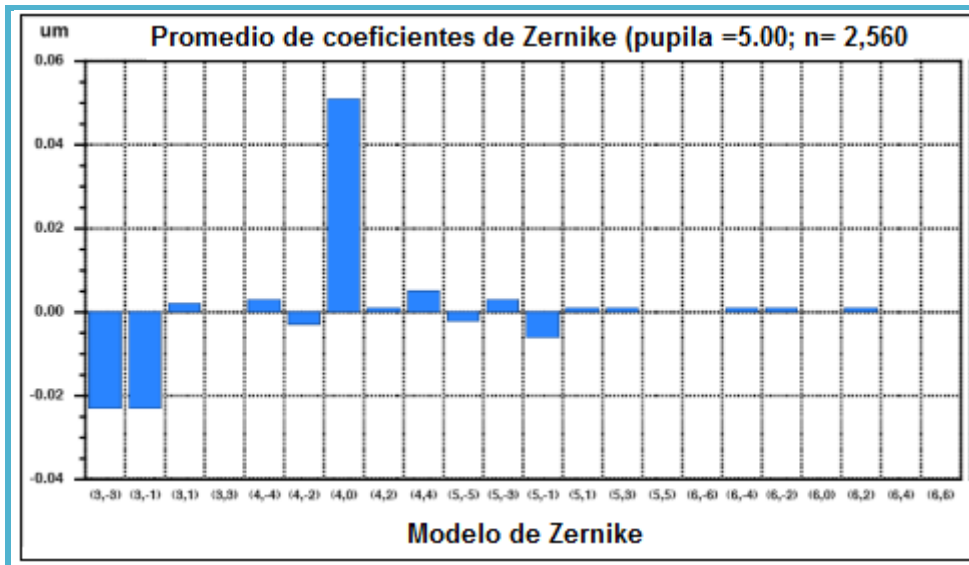


Tabla 1-5: Coeficientes de Zernike para una pupila de 5mm de diámetro

Ajuste de los coeficientes de Zernike para un diámetro pupilar distinto

Fórmula aproximada para ajustar el valor de los coeficientes de Zernike para un diámetro pupilar distinto

$$\text{Coeficiente 2} = \frac{\text{pupila}2^n}{\text{pupila}1^n} (\text{coeficiente 1})$$

Donde n = Orden de Zernike para determinado coeficiente

Ejemplo

Asuma que el valor de Z_4^0 (aberración esférica) para una pupila de 6.0 mm de diámetro es de 0.13. Estime el valor de Z_4^0 para una pupila de 5.0 mm de diámetro:

- Coeficiente 1 = 0.13 μm
- Diámetro pupilar 1 = 6.0 mm
- Diámetro pupilar 2 = 5.0 mm
- n = 4 (aberración de cuarto orden)

$$\text{Coeficiente 2} = \frac{5^4}{6^4} (0.13) = (0.48)(0.13) = 0.06 \mu\text{m}$$

Note que esta fórmula aplica solamente para un modelo de Zernike, no para RMS, que combina modelos. Para computar un ajuste al valor RMS, usted debe:

- Ajustar cada coeficiente de Zernike uno por uno
- Computar el RMS para los modelos que quiere combinar

COMPUTANDO EL RMS

Dados los coeficientes para cada modelo de Zernike, usted puede computar fácilmente el valor RMS para dichos modelos combinados. Esto le permitirá cuantificar el total de la magnitud de las aberraciones (Modelos de Zernike) combinadas. La fórmula para el RMS es:

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum [(C_n^m)^2 + (C_n^m)^2 + (C_n^m)^2 + K]}$$

ABERRACIONES DE ALTO ORDEN (HOA) (CONT.)

Donde, C_n^m se refiere a los coeficientes de Zernike de interés. Usted puede computar el defecto de frente de onda RMS para cualquier combinación de los modelos de Zernike, pero, se utilizan generalmente para hallar el efecto total combinado de todas las alteraciones de alto orden en un solo orden

Por ejemplo, usando los valores de los coeficientes de Zernike de la fila 1 de la tabla 3.1 (el ojo élite), compute el RMS para una aberración de tercer orden combinada.

$$\text{RMS} = \sqrt{\sum [(-0.07)^2 + (0.02)^2 + (-0.09)^2 + (0.01)^2 + (0)^2]} = 0.12 \mu\text{m}$$

PRECISIÓN DE LOS ABERRÓMETROS

Estudios iniciales, incluyendo los estudios del profesor Thomas Salmon en la Northeastern State University, probaron la precisión de los sensores de Shack- Hartmann para medir la óptica del ojo humano. Con estos lentes, su aberrómetro fue capaz de medir distorsiones tan pequeñas como $0.002 \mu\text{m}$, lo que es equivalente aproximadamente a 0.008 dioptrías (Dpt) de un defecto refractivo. Este nivel de precisión es difícil de obtener con el ojo humano porque factores como:

- Movimiento de los ojos o cabeza durante la medición
- Fluctuaciones en la acomodación y el tamaño pupilar
- Fluctuaciones en la película lagrimal

Además es difícil validar un instrumento tan preciso, ya que es por mucho, más preciso que cualquier otro método para medir defectos refractivos. Él encontró, sin embargo, que había similitudes entre la aberrometría subjetiva (empleando una técnica inventada por Smirnov en 1960- Fig.1-6) y las mediciones de Shack-Hartmann de los mismos ojos (Fig 1-7). Su investigación mostró que, en promedio, las medidas COAS de la esfera y el cilindro coinciden bien con una refracción clínica subjetiva. Otro estudio reciente con ojos esquemáticos ha verificado que los aberrómetros de Shack-Hartmann brindan medidas precisas de las aberraciones de alto orden.

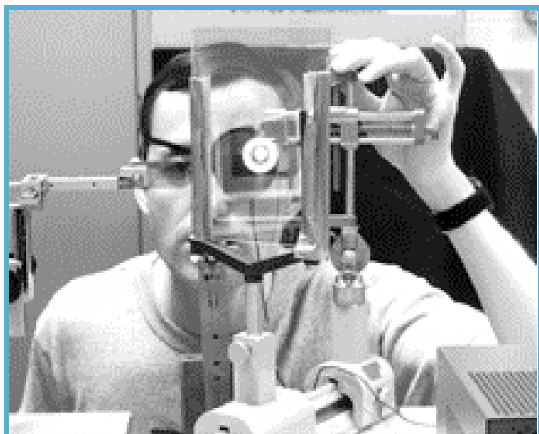


Tabla 1-6: Midiendo las aberraciones empleando un equipo de Smirnov

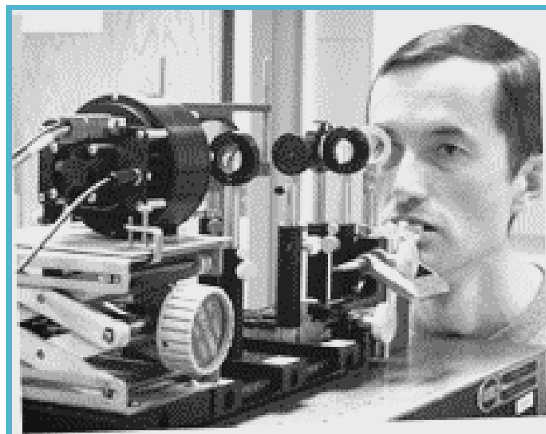


Tabla 1-7: Sensor de Shack-Hartmann en uso

BALANCEO DE LAS ABERRACIONES EN EL OJO HUMANO

Los diseñadores de lentes optimizan los sistemas de imagenología óptica hechos por el hombre, balanceando las aberraciones positivas de un elemento con la aberración negativa de otro. Esto se cumple en cierto grado con el astigmatismo. La córnea generalmente tiene un astigmatismo con la regla, pero, el cristalino generalmente tiene un leve astigmatismo contra la regla. Como resultado, el astigmatismo total del ojo es menor al de la córnea.

Por años, los científicos especularon sobre si el balanceo se da o no para aberraciones de alto orden. El balanceo efectivo entre la córnea y el cristalino varía de una persona a otra y en la misma persona, de un modelo a otro. Algunas personas tienen un balanceo benéfico (el cristalino ayuda a neutralizar la córnea), mientras que otras tienen un balanceo adverso (las aberraciones del cristalino se suman a las de la córnea) en ciertos modelos.

Un estudio por Artal et al (2002) sugiere que para muchos ojos adultos jóvenes y sanos, las aberraciones de alto orden internas tienden a tener un signo opuesto para una aberración corneal correspondiente. En estos casos, las aberraciones corneales serán balanceadas por la óptica interna y la efectividad del balanceo dependerá de las magnitudes relativas de las aberraciones corneales e internas. Con el tiempo y con los cambios cristalinianos relacionados a la edad, el balanceo efectivo en esos ojos parece descompensarse, como resultado, todas las aberraciones del ojo tienden a incrementar con la edad (Fig. 1-8).

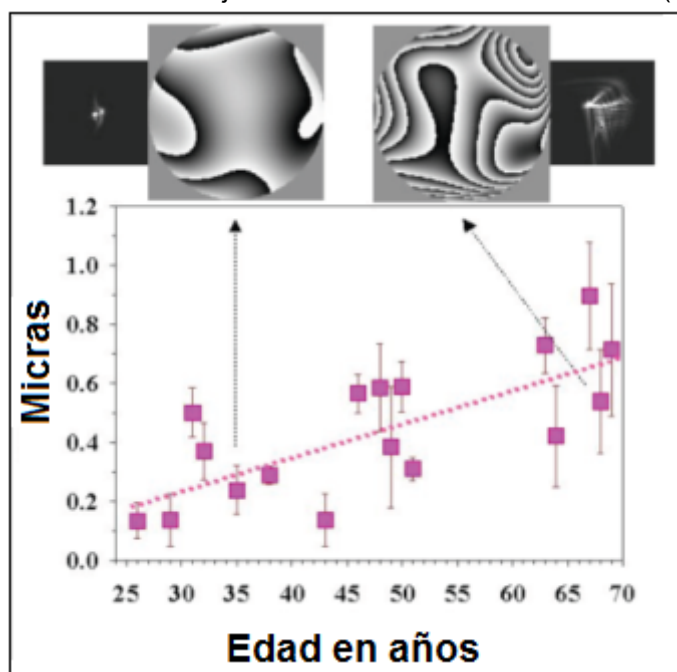


Tabla 1-8: Cambios en las aberraciones según la edad

El total de las aberraciones de frente de onda de alto orden (Error RMS) para 17 ojos, en un rango de 15 a 70 años de edad. Las aberraciones de alto orden parecen incrementar con la edad, aunque, existen variaciones individuales. Las flechas indican mapas de aberración de onda y los puntos de dispersión representan funciones correspondientes a dos puntos de información, para un ojo joven y otro de mayor edad (De: Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR. J Vision, 2001;1: 1-8. Copiado con permiso)

CORRECCIÓN ÓPTICA ADAPTABLE AL OJO

Los sensores de frente de onda fueron diseñados originalmente para que los militares y astrónomos midieran las aberraciones atmosféricas y luego las compensaran. Actualmente, la mayoría de los telescopios más grandes tienen los sensores de frente de onda de Shack-Hartmann para medir las aberraciones y un espejo variable para corregir dichas aberraciones. La óptica adaptativa (OA) hace referencia a los sistemas que miden y corrigen las aberraciones, especialmente las aberraciones de alto orden. Los sistemas OA, empleados inicialmente en la astronomía, han sido aplicados al ojo humano para:

1. Corregir la visión
2. Mejorar las fotografías de fondo de ojo

CORRECCIÓN ÓPTICA ADAPTABLE AL OJO (CONT.)

BENEFICIOS VISUALES DE CORREGIR LAS ABERRACIONES

Diversos investigadores en la universidad de Rochester Center for visual Science, corrigieron las aberraciones monocromáticas con un espejo deformable y midieron qué tanto mejoraba la visión. También estudiaron el beneficio de corregir aberraciones tanto monocromáticas como cromáticas. La corrección solamente de aberraciones cromáticas mejoró un poco la visión ya obtenida con la mejor prescripción óptica. La corrección de las aberraciones monocromáticas mejoró la visión aun más de la obtenida con la mejor prescripción óptica y la mayor mejoría fue evidenciada cuando tanto las aberraciones cromáticas como las monocromáticas fueron corregidas (Figura 1-9)

ÓPTICA ADAPTATIVA PARA FOTOGRAFÍAS DE FONDO DE OJO

La corrección visual no es el único beneficio clínico de la óptica adaptativa. El corregir las aberraciones de alto orden del ojo también permite obtener imágenes más claras de la retina. Investigadores de la universidad de Rochester diseñaron un oftalmoscopio de óptica adaptativa que permitió observar imágenes nunca antes vistas de microestructuras de la retina (Figura 1-10), incluyendo fotos de conos maculares individuales. Esto le permitió a los doctores Austin Roorda y David Williams estudiar la disposición de los conos S, M y L, que son los tres tipos de fotorreceptores que brindan el estímulo sensorial básico para la visión del color.

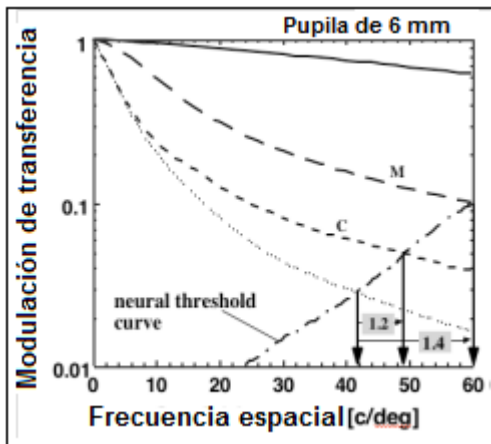


Tabla 1-9: Modulación de transferencia teórica (MTFs) tras la corrección de un desenfoque y solo astigmatismo (curva más baja), adicionalmente corrección de aberración cromática solamente (curva C), corrección de desenfoque, astigmatismo y aberraciones monocromáticas (curva M) y corrección de todas las aberraciones (curva superior). La agudeza visual mejora en un factor de 1.2 cuando las aberraciones cromáticas son corregidas y en un factor de 1.4 cuando las aberraciones monocromáticas son corregidas (De: Yoon GY and Williams DR. J. Opt. Soc. Am. A, 2002;19: 266-275 Copiado con autorización.).

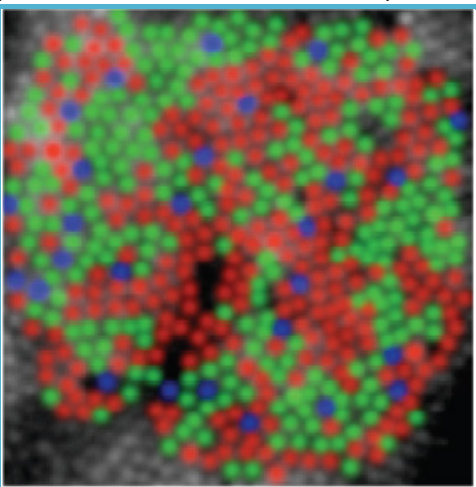


Tabla 1-10: Fotografía de fondo de ojo de alta resolución que muestra conos individuales en la mácula.

El color fue añadido para identificar los conos S (azul), M (verde) y L (rojo). Obtenida usando una cámara de fondo de ojo con óptica adaptativa. Cortesía de Dr. Austin Roorda, University of Houston

RELACIÓN ENTRE RMS, COEFICIENTES DE ZERNIKE Y VISIÓN

Diversos estudios han mostrado que, para ojos con aberraciones de gran magnitud, existe una buena correlación entre el total de RMS de alto de orden y la visión. Sin embargo, para ojos con aberraciones de menor magnitud, existe una baja correlación entre el RMS de las aberraciones de alto orden y la AV. (Applegate, Ballentine, Gross, Sarver & Sarver, 2003a).

La relación entre la óptica y la visión es un poco confusa, pues como los ha demostrado Applegate, no todas las aberraciones son iguales (Applegate, Sarver & Khemsara, 2002). Algunos modelos degradan la AV más que otros, incluso con la misma cantidad de error RMS. Al considerar modelos individuales aislados, aquellas que tengan una superscripción menor (m de " Z_n^m "), en cada orden de Zernike (modelos más cercanos al centro de la pirámide), tienen un efecto adverso más drástico en la AV. Por ejemplo, $0.2 \mu\text{m}$ de Z_4^0 es peor que $0.2 \mu\text{m}$ de Z_4^{-2} o Z_4^4 .

Applegate et al (2003b) estudió el efecto en la visión de un par de modelos de Zernike y encontró que la interacción entre modelos es compleja. Para algunos pares de modelos, las aberraciones en un modelo pueden ayudar a neutralizar las aberraciones del otro. Por ejemplo, Un desenfoque de RMS de $0.25 \mu\text{m}$ Z_2^0 puede ser peor que un RMS of $0.25 \mu\text{m}$ para Z_2^0 y Z_4^0 combinado.

La conclusión es que el RMS no es bueno para predecir la visión cuando las aberraciones son relativamente bajas. Este sería el caso en un ojo normal bien corregido o en un ojo que tuvo una cirugía refractiva guiada con frente de onda de manera exitosa. Thibos y otros, por tanto, intentaron encontrar alguna fórmula, métrica y matemáticamente derivada de los coeficientes de Zernike, lo cuál sería útil para predecir la agudeza visual. Ellos pusieron a prueba 33 métricas y encontraron varias que fueron útiles. Funcionaron de tal forma que se logró especular que funcionarían mejor que la refracción subjetiva (nuestro gold standard) para determinar la prescripción que permitiría alcanzar la mejor AV (Thibos et al, 2004).

EJEMPLOS RECIENTES DE INVESTIGACIÓN DE ABERRACIONES

- La aberrometría fue empleada para comparar como se comportan dos lubricantes oculares diferentes en el ojo.
- La aberrometría fue empleada para estudiar los cambios en la óptica del ojo que a su vez estaban acompañados de cambios en los niveles de glucosa en sangre para pacientes diabéticos y no diabéticos.
- La aberrometría fue empleada para comparar la calidad óptica de dos lentes de contacto esférico que dicen la aberración esférica
- La aberrometría fue empleada para estudiar la capacidad de humectación y secado de un lente de contacto.

NORMAS DE ZERNIKE- DEBEN RECORDARSE

- (Remitirse a las tablas de referencia de OCO)
- Conocer los modelos de Zernike, su fórmula Z y su forma
- Aberraciones de segundo orden
- Aberraciones de tercer orden
- Aberración esférica (entre las aberraciones de quinto y cuarto orden)
- Conocer el promedio del valor RMS para aberraciones de alto orden para una pupila de 6.0mm

LECTURAS SELECCIONADAS/REFERENCIAS

- Salmon TO, van de Pol C. **Evaluation of a clinical aberrometer for lower-order accuracy and repeatability, higher-order repeatability and instrument myopia.** Optom J Am Opt Assoc 2005;76:461-72.
- Rodriguez PN, Gonzalez L, Hernandez JL. **Accuracy and reproducibility of Zywave, Tracey, and experimental Aberrometers.** J Ref Surg 2004;20:810-817
- Salmon TO, West RW, Gasser W, Kenmore T. **Measurement of refractive errors in young myopes using the COAS Shack-Hartmann aberrometer.** Optom Vis Sci 2003;80:6-14
- Cheng X, Himebaugh NL, Kollbaum PS, Thibos LN, Bradley A. **Validation of a clinical Shack-Hartmann aberrometer.** Optom Vis Sci 2003;80:587-595
- Moreno-Barriuso E, Marcos S, Navarro R, Burns SA. **Comparing laser ray tracing, the spatially resolved refractometer, and the Hartmann-Shack sensor to measure the ocular wave aberration.** Optom Vis Sci 2001;78:152-156
- Salmon TO, Thibos LN, Bradley A. **Comparison of the eye's wave-front aberration measured psychophysically and with the Shack-Hartmann wave-front sensor.** J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis 1998;15:2457-2465
- Amano SA, Yamagami S, Miyai T, Miyata K, Samejima T, Oshika T. **Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations.** Am J Ophthalmol 2004;137:988-992
- Cheng H, Barnett J, Vilupuru A, et al. **A population study on changes in wave aberrations with accommodation.** J Vision 2004;4:272-280
- Brunette I, Bueno JM, Parent M, Hamam H, Simonet P. **Monochromatic aberrations as a function of age, from childhood to advanced age.** Invest Ophthalmol Vis Sci 2003;44:5438-5446
- Wang L, Koch DD. **Ocular higher-order aberrations in individuals screened for refractive surgery.** J Cataract Refract Surg 2003;29:1896-1903
- Thibos LN, Bradley A, Hong X. **A statistical model of the aberration structure of normal, well-corrected eyes.** Ophthalmic Physiol Opt 2002;22:427-433
- Thibos L, Hong X, Bradley A, Cheng X. **Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes.** J Opt Soc Am A 2002;19:2329-2348
- Castejon-Mochon JF, LopezGil N, Benito A, Artal P. **Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population.** Vis Res 2002;42:1611-1617
- Porter J, Guirao A, Cox I, Williams DR. **Monochromatic aberrations of the human eye in a large population.** J Opt Soc Am A 2001;18:1793-1803
- ANSI. **American National Standard for Ophthalmics—Methods for reporting optical aberrations of eyes:** ANSI, 2004
- Thibos L, Applegate R, Schwiegerling J, Webb R, Members VST. **Standards for Reporting the Optical Aberrations of the Eye.** In: Lakshminarayanan V, editor. **Vision Science and Its Applications.** Santa Fe, NM: Optical Soc Am, 2000:232-244
- Atchison D, Scott D, Cox M. **Mathematical Treatment of Ocular Aberrations: a User's Guide.** In: Lakshminarayanan V, editor. **Vision Science and Its Applications.** Santa Fe, NM: Optical Soc Am, 2000: 110-130
- Campbell CE. **Matrix method to find a new set of Zernike coefficients from an original set when the aperture radius is changed.** J Opt Soc Am A 2003;20:209-217
- Schwiegerling J. **Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil sizes.** J Opt Soc Am A 2002;19:1937-1945
- Ginis HS, Plainis S, Pallikaris A. **Variability of wavefront aberration measurements in small pupil sizes using a clinical Shack-Hartmann aberrometer.** BMC Ophthalmol 2004;4:1
- Campbell C. **A New Method for Describing the Aberrations of the Eye Using Zernike Polynomials.** Optom Vis Sci 2003;80:79-83
- Thibos L. **The chromatic eye: a new reduced-eye model of ocular chromatic aberration in humans.** Appl Optics 1992;31:3594-3600
- Levy Y, Segal O, Avni I, Zadok D. **Ocular higher-order aberrations in eyes with supernormal vision.** Am J Ophthalmol 2005;139:225-228

- Zadok D, Levy Y, Segal O, Barkana Y, Morad Y, Avni I. **Ocular higher-order aberrations in myopia and skiascopic wavefront repeatability.** J Cataract Refract Surg 2005;31:1128-1132
- Netto MV, Ambrosio R Jr., Shen TT, Wilson SE. **Wavefront analysis in normal refractive surgery candidates.** J Refract Surg 2005;21:332-338
- Artal P, Ferro M, Miranda I, Navarro R. **Effects of aging in retinal image quality.** J Opt Soc Am A 1993;10:1656-1662
- Guirao A, Gonzalez G, Redondo M, Geraghty E, Norrby S, Artal P. **Average optical performance of the human eye as a function of age in a normal population.** Invest Ophthalmol Vis Sci 1999;40:203-213
- Calver RI, Cox MJ, Elliot DB. **Effect of aging on the monochromatic aberrations of the human eye.** J Opt Soc Am A 1999;9:2069-2078
- McClellan JS, Marcos S, Burns SA. **Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye.** Invest Ophthalmol Vis Sci 2001;42:1390-1395
- He JC, Sun P, Held F, Thorn F, Sun X, Gwiazda JE. **Wavefront aberration in eyes of emmetropic and moderately myopic school children and young adults.** Vis Res 2002;42:1063-1070
- Artal P, Berrio E, Guirao A. **Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age.** J Opt Soc Am A 2002;19:137-143
- Wang L, Santaella RM, Booth M, Koch DD. **Higher-order aberrations from the internal optics of the eye.** J Cataract Ref Surg 2005;31:1512-1519
- Applegate RA, Ballentine C, Gross H, Sarver EJ, Sarver CA. **Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error.** Optom Vis Sci. 2003 Feb;80(2):97-105
- Applegate RA, Sarver EJ, Khemsara V. **Are all aberrations equal?** J Refract Surg. 2002 Sep-Oct; 18(5):S556-62
- Applegate RA, Marsack JD, Ramos R and Sarver EJ. **Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance.** 2003. Journal of Cataract & Refractive Surgery 29 (8): 1487-1495
- Thibos, L. N., Hong, X., Bradley, A., & Applegate, RA. **Metrics of optical quality of the eye.** 2004. Journal of Vision