

Aberraciones de alto orden en ojos con queratocono, medidas mediante análisis de frente de onda Hartmann-Shack

Dra. Katya Edith Torres-Soriano, Dra. Narily del Carmen Ruiz-Quintero, Dr. Ramón Naranjo-Tackman

RESUMEN

Objetivo: Describir las aberraciones de alto orden en ojos con queratocono, mediante el análisis de frente de onda Hartmann-Shack.

Material y métodos: Estudio prospectivo, descriptivo y transversal. Se estudiaron 55 ojos de 38 pacientes. Se realizó a cada paciente: agudeza visual, refracción, topografía corneal (Orbscan II) y aberrometría (Ladarwave).

Resultados: La edad promedio de los pacientes fue 28.95 ± 8.62 años; 21 ojos (38.18%) presentaron queratocono estadio I, 22 ojos (40%) estadio II, 10 (18.18%) estadio III y 2 ojos (3.64%) estadio IV. Las aberraciones oculares de alto orden más importantes, según polinomios de Zernique, para una pupila de 6.50 mm fueron: la coma vertical (-1.21 micras ± 1.16) y la aberración esférica (-0.46 micras ± 0.6). La coma vertical resultó 2.7 veces mayor que la aberración esférica. De acuerdo con el grado de queratocono encontramos: coma vertical [3,1]: -0.73 ± 0.82 ; -1.38 ± 1.28 ; -1.84 ± 1.30 ; -1.35 ± 1.10 micras y aberración esférica [4,0]: -0.13 ± 0.42 ; -0.58 ± 0.48 ; -0.96 ± 1.00 ; -0.13 ± 0.19 micras, para queratocono I, II, III y IV respectivamente. La aberración esférica presentó diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre los diferentes grados de queratocono.

Conclusion: La coma vertical es la aberración de alto orden dominante en ojos con queratocono, y la aberración esférica es un parámetro significante para distinguir los diferentes grados de queratocono.

Palabras clave: aberraciones, queratocono, frente de onda.

SUMMARY

Objective: To describe the higher-order aberrations in eyes with keratoconus measured with wavefront Hartmann-Schack. Material and methods: Prospective, descriptive and cross-sectional study. We studied 55 cases in 38 patients. It was made in each patient: Visual acuity, refraction, corneal topography (Orbscan II) and aberrometry (Ladarwave).

Results: The age average of the patients was 28.95 ± 8.62 years; 21 eyes (38.18%) presented keratoconus stage I, 22 eyes (40%) stage II, 10 (18.18%) stage III and 2 eyes (3.64%) stage IV. More important the ocular aberrations of high order, according to polynomials of Zernique, for a pupil of 6.50 mm were: the vertical coma (-1.21 microns ± 1.16) and the spherical aberration (-0.46 microns ± 0.6). The vertical coma was 2.7 times greater than the spherical aberration. According to the degree of keratoconus we found: vertical coma [3,1]: -0.73 ± 0.82 ; -1.38 ± 1.28 ; -1.84 ± 1.30 ; -1.35 ± 1.10 microns and spherical aberration [4,0]: -0.13 ± 0.42 ; -0.58 ± 0.48 ; -0.96 ± 1.00 ; -0.13 ± 0.19 microns for keratoconus I, II, III and IV respectively. The spherical aberration display statistically significant difference ($p < 0.05$) between different the degrees from keratoconus

Conclusions: Vertical coma is the dominant higher-order aberrations in people with keratoconus, and the spherical aberration is a significant parameter to distinguish the different degrees from keratoconus.

Key words: aberrations, keratoconus, wavefront.

INTRODUCCIÓN

El queratocono es una patología no inflamatoria caracterizada por adelgazamiento central y protrusión anterior de la córnea (1, 2). La protrusión corneal asimétrica induce astig-

mismo irregular ocasionando alteración en la función visual (1, 3). Muchos estudios previos han evaluado la desformidad y el efecto de los ojos con queratocono en la capacidad óptica. El hallazgo topográfico típico en los ojos con queratocono es el incurvamiento corneal anormal localizado (4-6).

Hospital Dr. Luis Sánchez Bulnes, Asociación para Evitar la Ceguera en México.

Correspondencia: Dra. Katya Edith Torres Soriano. Vicente García Torres, 75, Interior 19, Colonia San Lucas, Coyoacan, Mexico DF, CP: 04030. Tel: 5556585705, Cel: 044-5522983855, E-mail: katytorres28@hotmail.com

Desde que Liang (7) y Liang y cols. (8) introdujeron el aberrómetro de Hartmann-Shack a la ciencia de la visión, el sensor de frente de onda ha sido ampliamente aceptado como una herramienta para cuantificar las aberraciones en el ojo humano. El análisis de frente de onda mide la refracción en cada área de la córnea. Esto se logra analizando y registrando la luz que es reflejada desde la mácula y se refracta hacia fuera del ojo a través de cada punto de la córnea y el cristalino. Esta tecnología también ha proporcionado información sobre las aberraciones de alto y bajo orden en ojos normales, lo cual está bien documentado (9). El aberrómetro de Hartmann-Shack es el método más popular para medir las aberraciones oculares monocromáticas de alto orden. Proporciona datos objetivos y seguros de alta resolución necesarios para correcciones guiadas por frente de onda, y ayuda a diagnosticar ojos con óptica anormal. El método de frente de onda disierne la refracción del ojo dentro de 0.05 D, con aproximadamente mayor seguridad que la forometría, autorrefracción o análisis topográfico, por lo cual, además de la topografía, el frente de onda tiene el potencial para llegar a ser otra herramienta diagnóstica específica y sensible en ojos con queratocono. El diagnóstico diferencial de la óptica anormal requiere comparación con valores normales, provenientes de la experiencia clínica y refiriéndose a las bibliografías publicadas. Existen estudios que reportan mediciones de aberrométrias en grandes poblaciones de ojos normales realizadas mediante el método de Hartmann-Shack (9-16). Las aberraciones de alto orden en ojos con queratocono han sido evaluadas previamente, la tecnología del sensor de frente de onda ha demostrado que las aberraciones corneales y oculares de alto orden son significativamente mayores en ojos con queratocono que en ojos normales, principalmente la coma (17, 18).

Los polinomios de Zernique son una combinación de funciones trigonométricas y radiales. La expansión de los polinomios de Zernique ha sido uno de los métodos más usados para representar las aberraciones oculares de alto orden y la descripción de la superficie corneal. El éxito de la representación simplificada de las aberraciones de alto orden expresado en términos de vector de Zernique ha sido reportado previamente y permite un entendimiento de la relación entre la aberraciones corneales anteriores y posteriores (19-21). Las formas corneales complejas, como es el caso del queratocono, pueden describirse de una manera estandarizada usando los polinomios de Zernique (22-25). En contraste, la mayoría de los índices topográficos del queratocono se basan en datos obtenidos con equipos específicos de topografía corneal. En varios estudios se ha sido demostrado la ventaja del uso del método de descomposición de Zernique para el diagnóstico del queratocono (22, 25-28).

Las características de las aberraciones de alto orden no han sido bien estudiadas en pacientes con queratocono. En este estudio mediremos las aberraciones oculares y corneales en ojos con queratocono en sus diferentes estadios, usando el sensor de frente onda Hartmann-Shack, y analizaremos las aberraciones de alto orden, comparando los resultados entre los diferentes grados de queratocono. Esto nos per-

mitirá investigar las características de las aberraciones de alto orden en pacientes con queratocono.

MATERIAL Y MÉTODO

Se realizó un estudio prospectivo, descriptivo y transversal, de pacientes con diagnóstico de queratocono, que acudieron al servicio de córnea de nuestro hospital, durante el periodo comprendido entre mayo y octubre de 2008. Se incluyeron a todos los pacientes con diagnóstico de queratocono según clasificación de Amsler-Krumeich. Los criterios de exclusión fueron ojos operados de queratoplastia penetrante, segmentos intraestromales o cross-linking y pacientes con enfermedades sistémicas de afección ocular.

Se le realizó a cada paciente AV no corregida, AV corregida, refracción y topografía (Orbscan II), de donde se tomaron las queratometrías y la paquimetría mínima. Se clasificó el queratocono de acuerdo con la clasificación de Amsler-Krumeich, el cual toma en cuenta dichos parámetros.

Posteriormente se realizó aberrometría (Aberrometro: LADARWave® Custom Cornea® Wavefront System, de Alcon; Modelo: 6509-0500-01), para una pupila de 6.50 mm, mediante el cual se estudió la aberración presente en cada ojo.

Se aplicaron las estadísticas descriptivas básicas, (porcentajes, medidas de tendencia central y de dispersión), así como el método no paramétrico de Wilcoxon del programa SPSS, para comparar las diferentes variables.

RESULTADOS

Se incluyeron 55 ojos de 38 pacientes, constituido por 18 hombres (47.37%) y 20 mujeres (52.63%), con una edad promedio de 28.95 ± 8.62 años. La AV no corregida promedio fue logmar = 1.25 ± 0.49 (rango: 0.1-1.9), 20/400 (rango: 20/25-20/1600). La AV corregida promedio fue: logmar = 0.38 ± 0.28 (rango: 0-1.5), 20/50 (rango: 20/20-20/630).

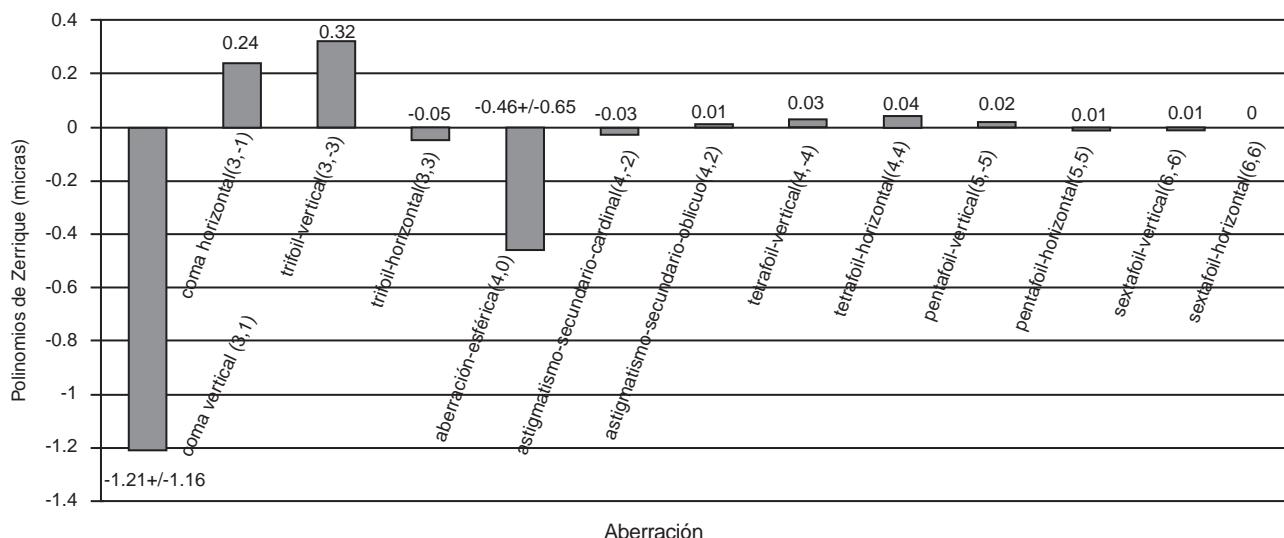
El queratocono se clasificó de acuerdo a Amsler-Krumeich, quienes toman en cuenta cuatro parámetros para su estatificación: Esfera, cilindro, K central promedio y paquimetría mínima. Se estudiaron 21 ojos (38.18%) con queratocono estadio I, 22 casos (40%) con queratocono estadio II, 10 casos (18.18%) con queratocono estadio III y 2 casos (3.64%) estadio IV. El cuadro 1 expone la esfera, cilindro, K central promedio y paquimetría mínima promedios para cada grado de queratocono.

Las aberraciones de alto orden más importantes en ojos con queratocono fueron la coma vertical ($-1.21 \text{ micras} \pm 1.16$) y la aberración esférica ($-0.46 \text{ micras} \pm 0.6$). La coma vertical resultó 2.7 veces mayor que aberración esférica. La gráfica 1 representa la distribución de las aberraciones de alto orden en ojos con queratocono. Las aberraciones corneales de alto orden según polinomios de Zernique, para una pupila de 6.50 mm fueron: Coma vertical [3, 1]: -0.73 ± 0.82 ; -1.38 ± 1.28 ; -1.84 ± 1.30 ; -1.35 ± 1.10 micras y coma horizontal [3, -1]:

Cuadro 1. Esfera, cilindro, K central promedio y paquimetría mínima para cada grado de queratocono

Grado de QTC	QTC I	QTC II	QTC III	QTC IV
Esfera (dioptrías)	-1.37±1.51 (-3.5 - +2.75)	-5.32±2.44 (-9 - +2.25)	-8.08±5.66 (-13 - +2)	-10±0
Cilindro (dioptrías)	-4.06±2.08 (-0.5 - -7.5)	-5.59±1.37 (-2.5 - -8)	-7.35±2.31 (-3.5 - -11)	-1.5±0.71 (-1 - -2)
K central promedio (dioptrías)	45.48±1.48 (42.8 - 47.6)	48.13±2.11 (45.2 - 52.6)	50.4±3.17 (44.2 - 53.3)	52.65±3.60 (50.1 - 55.2)
Paquimetría mínima (micras)	459.43±35.21 (391 - 524)	445.90±48.10 (352 - 540)	369.7±44.82 (311 - 462)	341.5±127.98 (251 - 432)

Gráfica 1. Distribución de ojos con queratocono según aberraciones de alto orden

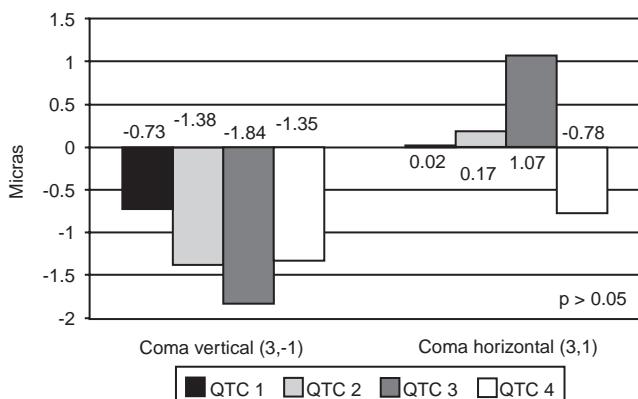


0.02±0.49; 0.17±0.68; 1.07±1.41; -0.78±0.28 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente (Gráfica 2).

Trifoil-vertical [3, -3]: 0.29±0.44; 0.36±0.45; 0.36±1.06; 0.00±0.27 micras, y Trifoil-horizontal [3, 3]: -0.28±0.57; -0.05±0.52; 0.32±0.88; 0.40±0.21 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente (Gráfica 3).

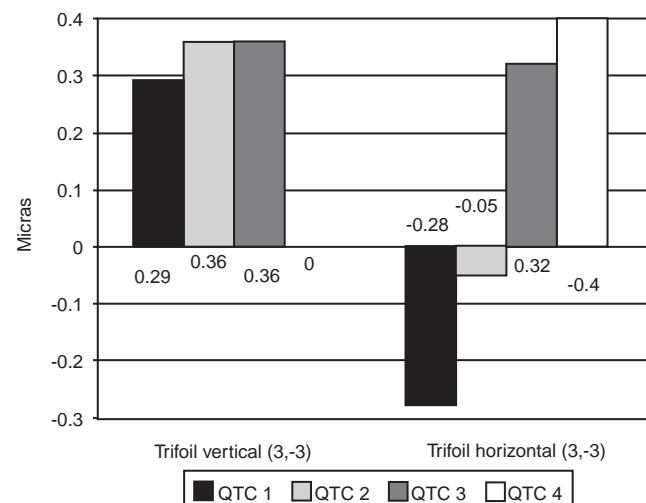
Aberración esférica (4, 0): queratocono I -0.13±0.42; queratocono II -0.58±0.48; queratocono III -0.96±1.00; y queratocono IV -0.13±0.19 micras (Gráfica 4).

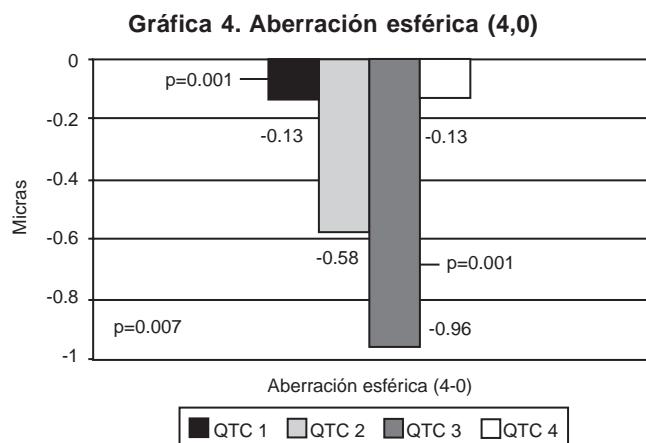
Gráfica 2. Coma vertical (3,-1) y coma horizontal (3,1)



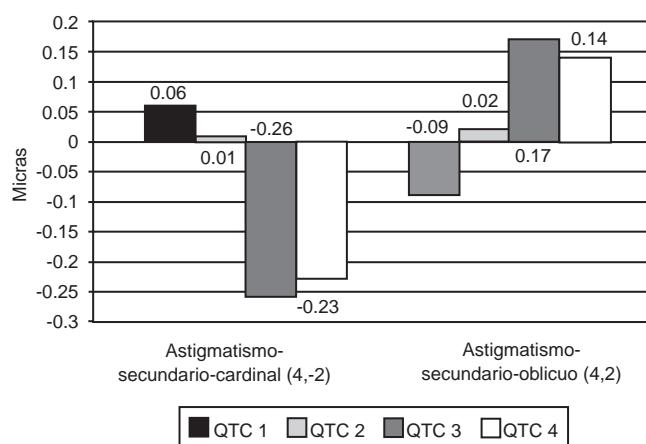
Astigmatismo-secundario-cardinal [4, -2]: 0.06±0.28; 0.01±0.32; -0.26±0.76; -0.23±0.12 micras (Gráfica 5) y astigmatismo-secundario-oblicuo [4, 2]: -0.09±0.40; 0.02±0.34; 0.17±0.78 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente.

Gráfica 3. Trifoil vertical (3,-3) y trifoil horizontal (3,3)

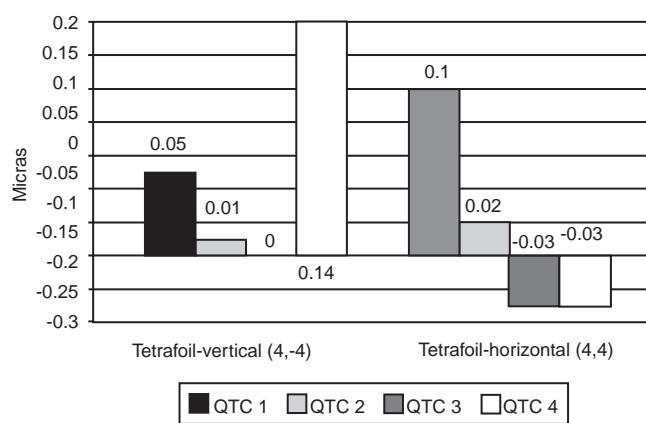




Gráfica 5. Astigmatismo secundario cardinal (4,-2) y astigmatismo secundario oblicuo (4,2)



Gráfica 6. Tetrafoil vertical (4,-4) y tetrafoil horizontal (4,4)



Tetrafoil-vertical [4, -4]: 0.05 ± 0.29 ; 0.01 ± 0.09 ; 0.00 ± 0.23 ; 0.14 ± 0.09 micras. Tetrafoil-horizontal [4, 4]: 0.10 ± 0.15 ; 0.02 ± 0.14 ; -0.03 ± 0.12 ; -0.03 ± 0.20 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente (Gráfica 6).

Pentafoil-vertical [5, -5]: 0.015 ± 0.12 ; 0.00 ± 0.05 ; 0.09 ± 0.24 ; 0.04 ± 0.03 micras y Pentafoil-horizontal [5, 5]: 0.012 ± 0.08 ; -0.01 ± 0.08 ; -0.06 ± 0.16 ; 0.05 ± 0.14 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente.

Sextafoil-vertical [6, -6]: -0.01 ± 0.04 ; 0.01 ± 0.04 ; -0.06 ± 0.05 ; -0.03 ± 0.09 micras y Sextafoil-horizontal [6, 6]: -0.01 ± 0.04 ; 0.01 ± 0.04 ; -0.06 ± 0.05 ; -0.03 ± 0.09 micras para queratocono I, II, III y IV respectivamente.

Las aberraciones de alto orden más expresadas en ojos con queratocono se muestran en el Cuadro 2.

Usando el método no paramétrico de Wilcoxon del programa SPSS, para comparar las diferentes variables, únicamente la aberración esférica presentó diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) entre los diferentes grados de queratocono (I y II, I y III).

DISCUSIÓN

Se espera que el cono en un ojo con queratocono presente un valor dióptrico mayor que el resto de la superficie corneal y presente un frente de onda deformado si es analizado en términos de polinomios de Zernike.

Las aberraciones de alto orden más importantes en los ojos con queratocono fueron el coma vertical con un promedio de -1.215 micras y la aberración esférica con un promedio de -0.463 micras. La coma resultó 2.7 veces mayor que la aberración esférica en ojos con queratocono. Estos resultados son similares a los obtenidos por Naoyuki Maeda y cols. (17) quienes usaron el sensor de frente de onda Hartmann-Shack y demostraron la presencia de aberraciones del tipo coma vertical y aberraciones esféricas en ojos con queratocono comparado con ojos normales. Pantanelli S y cols. (18) demostraron que las aberraciones de alto orden en ojos con queratocono y ojos con queratoplastia penetrante son 5.5 veces mayores que en ojos normales, entre las cuales la coma vertical negativa fue la dominante en ojos con queratocono y el trifoil en ojos con queratoplastia penetrante. Nuestros hallazgos también son congruentes con los observados por Batool J y cols. (29), y Alió y Shabayek (30) quienes también demostraron que la coma fue la aberración de alto orden significativamente más alta en ojos con queratocono comparado con ojos normales, concluyendo estos autores que el incremento de las aberraciones de alto orden en ojos con queratocono corresponde principalmente a la coma vertical.

Entre las aberraciones de alto orden que podríamos tomar en consideración cuando el queratocono es clasificado en grados, encontramos la aberración esférica, la cual nos reportó una diferencia estadísticamente significativa entre los diferentes grados de queratocono, sin embargo, a pesar de que no conseguimos diferencia estadísticamente significativa en la aberración del tipo coma, pudimos observar una variación ascendente con respecto al grado de queratocono. En el estudio realizado por Alió y Shabayek (30) reportan que la aberración del tipo coma podría ser tomada en cuenta para distinguir el queratocono en sus diferentes grados, ya que ellos encontraron correlación estadísticamente significativa entre la aberración del tipo coma y las K promedio, sin embargo, es importante destacar que usaron un método

Cuadro 2. Aberraciones de alto orden presentes en ojos con queratocono de acuerdo con su estadio

Aberración	QTC 1	QTC 2	QTC 3	QTC 4
Coma vertical (3,1)	-0.73 ± 0.82	-1.38 ± 1.28	-1.84 ± 1.30	-1.35 ± 1.10
Coma horizontal(3,-1)	0.02 ± 0.49	0.17 ± 0.68	1.07 ± 1.41	-0.78 ± 0.28
Trifoil-vertical(3,-3)	0.29 ± 0.44	0.36 ± 0.45	0.36 ± 1.06	0.00 ± 0.27
Trifoil-horizontal(3,3)	-0.28 ± 0.57	-0.05 ± 0.52	0.32 ± 0.88	0.40 ± 0.21
Aberración-esférica(4,0)	-0.13 ± 0.42	-0.58 ± 0.48	-0.96 ± 1.00	-0.13 ± 0.19
Astigmatismo-secundario-cardinal(4,-2)	0.06 ± 0.28	0.01 ± 0.32	-0.26 ± 0.76	-0.23 ± 0.12
Tetrafoil-vertical(4,-4)	0.05 ± 0.29	0.01 ± 0.09	0.00 ± 0.23	0.14 ± 0.09
Tetrafoil-horizontal(4,4)	0.10 ± 0.15	0.02 ± 0.14	-0.03 ± 0.12	-0.03 ± 0.20

distinto para medir las aberraciones como lo es el análisis videoqueratográfico del mapa corneal.

Mayores estudios serán necesarios para determinar la relación entre aberración de alto orden y función visual en pacientes con queratocono, tal como agudeza visual de alto contraste, sensibilidad al contraste, o agudeza visual de bajo contraste.

Es interesante conocer las características y severidad del daño visual resultante del astigmatismo irregular, debido a que nuestro conocimiento de astigmatismo irregular hará posible refinar la corrección del error refractivo o entender la calidad de visión en el paciente con astigmatismo irregular y queratocono.

Nosotros pensamos que las aberraciones de alto orden, especialmente la coma vertical y la aberración esférica, podrían ser tomadas en consideración cuando estadificamos el queratocono.

CONCLUSIONES

La coma vertical y la aberración esférica son las aberraciones de alto orden que relacionan su incremento directamente con el grado de queratocono. La coma vertical es la aberración más importante presente en ojos con queratocono, y la aberración esférica es un parámetro significante para distinguir los diferentes grados de queratocono.

REFERENCIAS

- Krachmer JH, Feder RS, Belin MW. Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 1984; 28:293-322.
- Bron AJ. Keratoconus. *Cornea* 1988; 7:163-169.
- Rabinowitz YS. Keratoconus. *Surv Ophthalmol* 1998; 42:297-319.
- Maguire LJ, Bourne WM. Corneal topography of early keratoconus. *Am J Ophthalmol* 1989; 108:107-112.
- Rabinowitz YS, McDonnell PJ. Computer-assisted corneal topography in keratoconus. *Refract Corneal Surg* 1989; 5:400-408.
- Wilson SE, Lin DT, Klyce SD. Corneal topography of keratoconus. *Cornea* 1991; 10:2-8.
- Liang J. A new method to precisely measure the wave aberrations of the eye with a Hartmann-Shack-wave front sensor [dissertation]. Heidelberg Germany: University of Heidelberg, 1991.
- Liang J, Grimm B Goelz, Bille JF. Objective measurement of wave aberration of the human eye with the using of a Hartmann-Shack wave front sensor. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 1994; 11:1949-57.
- Porter J, Guirao A, Cox IG, Williams DR. Monochromatic aberrations of the human eye in a large poblation. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 2001; 18:1793-803.
- Amano S, Amano Y, Yamagami S y cols. Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol* 2004; 137:988-992.
- Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS y cols. A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J Vision* 2004; 4(4):272-280.
- Brunette I, Bueno JM, Parent M y cols. 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 Opt Image Sci Vis* 2002; 19:2329-2348.
- Castejon-Mochon JF, López Gil N, Benito A, Artal P. Ocular wave-front aberration statistics in a normal young population. *Vision Res* 2002; 42:1611-1617.
- Maeda N, Fujikado T, Kuroda T y cols. Wavefront aberrations measured with Hartmann-Shack sensor in patients with keratoconus. *Ophthalmology* 2002; 109:1996-2003.
- Pantanelli S, MacRae S, Jeong TM, Yoon G. Characterizing the wave aberration in eyes with keratoconus or penetrating keratoplasty using a high-dynamic range wavefront sensor. *Ophthalmology* 2007; 114:2013-2021.
- Kosaki R, Maeda N, Bessho K y cols. Magnitude and orientation of Zernike terms in patients with keratoconus. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2007; 48:3062-3068.
- Campbell CE. A new method for describing the aberrations of the eye using Zernike polynomials. *Optom Vis Sci* 2003; 80:79-83.
- Oie Y, Maeda N, Kosaki R y cols. Characteristics of ocular higher-order aberrations in patients with pellucid marginal corneal degeneration. *J Cataract Refract Surg. Optom Vis Sci* 1996.
- Schwiegerling J, Greivenkamp JE. Keratoconus detection based on videokeratoscopic height data. *Optom Vis Sci* 1996; 73:721-728.

23. Schwiegerling J. Cone dimensions in keratoconus using Zernike polynomials. *Optom Vis Sci* 1997; 74:963-969.
24. Langenbucher A, Gusek-Schneider GC, Kus MM, Seitz B. Topographiegestützte Berechnung der Keratokonus-Dimensionen. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 1999; 214:372-377.
25. Langenbucher A, Gusek-Schneider GC, Kus MM y cols. Keratokonus-Screening mit Wellenfrontparametern auf der Basis topographischer Höhendaten. *Klin Monatsbl Augenheilkd* 1999; 214:217-223.
26. Gobbe M, Guillou M. Corneal wavefront aberration measurements to detect keratoconus patients. *Cont Lens Anterior Eye* 2005; 28:57-66.
27. Twa MD, Parthasarathy S, Roberts C y cols. Automated decision tree classification of corneal shape. *Optom Vis Sci* 2005; 82:1038-1046.
28. Büren J, Kühne C, Kohnen T. Wellenfrontanalyse zur Diagnose des subklinischen Keratokonus. *Ophthalmologe* 2006; 103:783-790.
29. Batool J, Xiaohui Li, Huiying Y y cols. Higher Order Wavefront Aberrations and Topography in Early and Suspected Keratoconus. *Refract Surg* 2007; 23:774-781.
30. Alió J, Shabayek M. Corneal Higher Order Aberrations: A Method to Grade Keratoconus. *J Refract Surg* 2006; 22:539-545.