

CORRELACIÓN AUTOMATIZADA DE HARTMANGRAMAS PARA TOPOGRAFÍA CORNEAL

Urita-Aguire S., Trujillo-Schiaffino G., Jalife-Chavira J. M., Salas-Peimbert D. P., Anguiano-Morales M.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CHIHUAHUA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.
Ave. Tecnológico No. 2909, Chihuahua Chih. 31310, México.

Autor para correspondencia: salvador.ur.ag@gmail.com

RESUMEN.

En el presente artículo se habla sobre la prueba de Hartmann, una técnica óptica para evaluar aberraciones en sistemas ópticos, especialmente en superficies esféricas y asféricas. Se cuantifican las desviaciones entre patrones de una pantalla de Hartmann y su respectiva placa de Hartmann. El artículo describe un método matemático, estadístico y computacional para correlacionar automáticamente puntos en arreglos aplicados en topografía corneal. Esto permite un análisis eficiente de las imágenes para determinar el nivel de aberración sin intervención manual significativa. El enfoque representa una oportunidad para mejorar la eficiencia en la realización de pruebas de Hartmann. Al automatizar el proceso de correlación, se agiliza la obtención de resultados precisos sobre la forma de la superficie corneal y las aberraciones presentes. La automatización también puede contribuir a una mayor objetividad y reproducibilidad en la evaluación de los hartmanngramas, lo que beneficiaría el campo de la topografía corneal.

Palabras Clave: Prueba de Hartmann, Topografía corneal, Aberraciones ópticas, Reconstrucción de frente de onda

ABSTRACT.

The present article discusses the Hartmann test, an optical technique for evaluating aberrations in optical systems, especially on spherical and aspherical surfaces. Deviations between patterns of a Hartmann screen and its corresponding Hartmann plate are quantified. The article describes a mathematical, statistical, and computational method to automatically correlate points in arrays applied in corneal topography. This allows for an efficient analysis of images to determine the level of aberration without significant manual intervention. The approach represents an opportunity to enhance the efficiency of Hartmann tests. Automating the correlation process streamlines the acquisition of accurate results regarding the shape of the corneal surface and existing aberrations. The automation can also contribute to greater objectivity and reproducibility in evaluating Hartmanngrams, benefiting the field of corneal topography.

Keywords: Hartmann test, Corneal topography, Optical aberrations, Wavefront reconstruction

1. INTRODUCCIÓN

La prueba de Hartmann es una técnica geométrica utilizada para evaluar superficies ópticas, llamada así por el astrofísico Johannes Hartmann, desarrollada en 1904. A pesar de ser una prueba óptica desarrollada hace más de 100 años que se originó para evaluar instrumentos astronómicos, sigue siendo aplicada en la actualidad no solo en astronomía, también en óptica visual,

como pruebas de lentes oftálmicos o en aberrometría del ojo humano. Esta técnica sigue siendo relevante debido a su alta precisión, simplicidad y facilidad de implementación [1].

En la actualidad, las mediciones del radio de curvatura corneal son fundamentales, ya que la córnea contribuye al 70% del poder refractivo total del ojo. El estado ideal de refracción es la emetropía, que permite una correcta formación de imágenes en la retina. Sin embargo, los errores refractivos en el ojo humano, conocidos como ametropía, impiden un proceso de visión óptimo. Las condiciones básicas de desenfoque son la miopía, hipermetropía y astigmatismo, clasificadas como aberraciones primarias. Estas aberraciones pueden corregirse mediante cirugía refractiva o mediante el uso de lentes de gafas y contacto, siendo estas últimas opciones más accesibles [2].

El test de Hartmann consiste en una pantalla con agujeros organizados que forman un patrón. Esta pantalla se coloca entre una fuente de luz y el sistema óptico en prueba, y los rayos que pasan caen sobre un detector o pantalla de observación sobre la cual se genera la placa Hartmann (Figura 1). El principio se basa en muestrear un frente de onda en múltiples ubicaciones y reconstruirlo cuando los puntos muestreados se relacionan entre sí. La ventaja es su alta precisión, pero la desventaja es el gran número de mediciones requeridas; sin embargo, las herramientas computacionales actuales, facilitan esta tarea en gran parte [3].

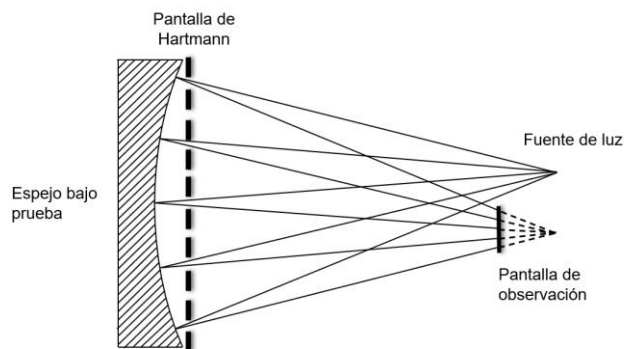


Figura 1. Esquema básico de la prueba de Hartmann clásica.

Las aberraciones ópticas en un sistema se pueden describir desde las perspectivas de ondas, longitudinales o transversales. Las transversales ocurren cuando un rayo se desvía de su posición

ideal en la imagen y tiene componentes horizontales y verticales. Conociendo un frente de onda plano deformado por una superficie, es posible conocer el frente de onda aberrado mediante relaciones exactas [4].

$$TA_x = -r \frac{\partial W(x,y)}{\partial x} \quad (1)$$

$$TA_y = -r \frac{\partial W(x,y)}{\partial y} \quad (2)$$

Donde TA son las aberraciones transversales y r es la distancia desde la superficie evaluada hasta la posición del captador de la imagen resultante como se muestra en la Figura 2 [1].

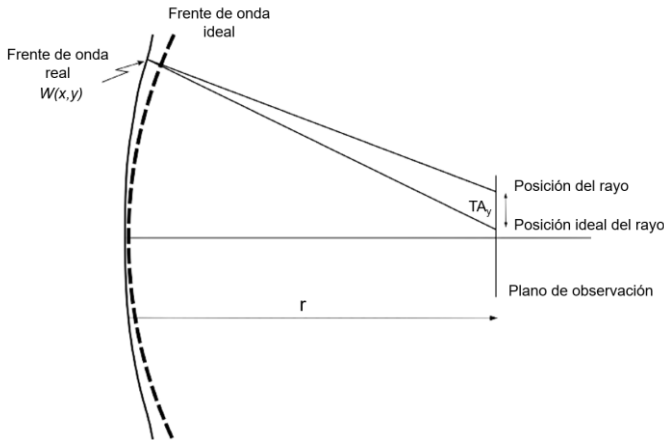


Figura 2. Relación entre los frentes de onda ideal y real y su respectivo trazo de rayos.

Sin embargo, aún con los medios computacionales actuales, sigue habiendo retos en la actualidad a la hora de hacer más eficiente la obtención de los resultados [5]. Esto es especialmente significativo a la hora de correlacionar el punto original de la pantalla de Hartmann y el punto correspondiente en la placa de Hartmann, para poder determinar de forma eficaz el desplazamiento que sufrió y así con las ecuaciones 1 y 2 determinar el valor de la aberración transversal del frente de onda y posteriormente poder reconstruir el frente de onda.

Este procedimiento hoy en día es desarrollado manualmente por el operador de la prueba, ya que computacionalmente se tiene problemas a la hora de determinar un orden para asignar etiquetas a los puntos de ambos diagramas y llevar a cabo una correlación [6], teniendo resultados en programas autónomos como el de la figura 3 para la pantalla de Hartmann, pero resultados incorrectos tal como en la figura 4 para su respectiva placa, cuando el ideal debería de ser el de la figura 5.

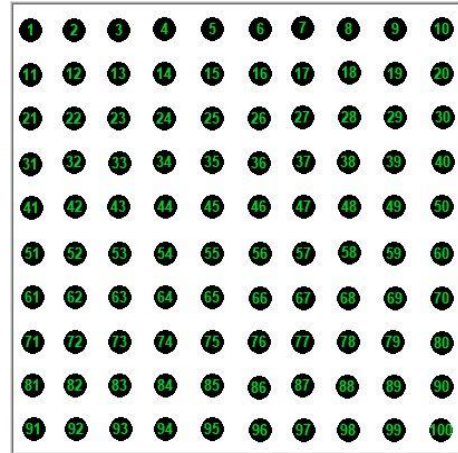


Figura 3. Pantalla Hartmann con puntos etiquetados.

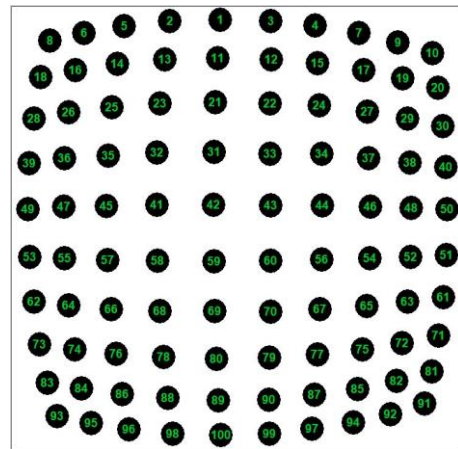


Figura 4. Placa Hartmann con puntos etiquetados por sistemas computacionales.

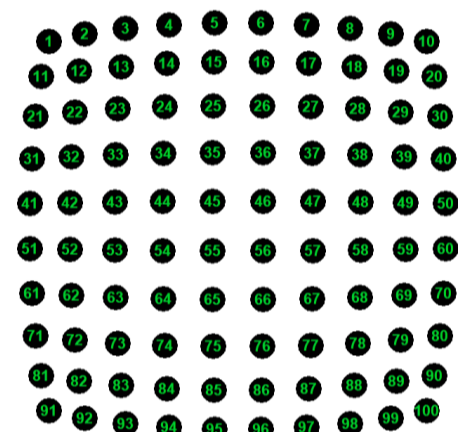


Figura 5. Placa Hartmann con puntos etiquetados por sistemas computacionales aplicando algoritmo propuesto.

A estas dificultades tiene que agregarse el cambio de la cantidad de puntos que se puede tener para una prueba y la distribución de los mismos [7]. Por lo cual, esta acción del proceso tiende a tomar una gran parte del mismo.

Y es en llevar a cabo la automatización de este proceso donde se llevó a cabo el presente trabajo.

2. MODELO PROPUESTO

Para desarrollar una herramienta que pudiese clasificar y etiquetar los diagramas de la prueba de Hartmann se tiene que contar con una cantidad significativa de imágenes. Para ello primero se desarrolló un algoritmo el cuál definiera la ubicación de los puntos en una placa de Hartmann a partir de una pantalla Hartmann. Para ello a partir de las ecuaciones 1 y 2 se calculo el desplazamiento horizontal y vertical que cada uno de los puntos tenía que sufrir utilizando como r la distancia focal de la córnea [2] y las ecuaciones de la tabla 1 [8].

Tabla 1. Derivadas parciales de los polinomios de Zernike

Orden n	No. de Polinomio	Derivada parcial en x $\frac{W(x,y)}{\partial x}$	Derivada parcial en y $\frac{W(x,y)}{\partial y}$	Nombre de aberración
2	4	$= 4\sqrt{2}x$	$= 4\sqrt{2}y$	Defoco
2	6	$= 2\sqrt{6}x$	$= -2\sqrt{6}y$	Astigmatismo
3	7	$= 2\sqrt{2}(9x^2 + 3y^2 - 2)$	$= 12\sqrt{2}xy$	Coma
4	9	$= \sqrt{5}(24x(x^2 + y^2) - 12x)$	$= \sqrt{5}(24y(x^2 + y^2) - 12y)$	Esféricidad

En la tabla 1 se muestran las derivadas parciales de los polinomios de Zernike propuestos para la reconstrucción del frente de onda de cada una de las aberraciones que son más observadas en la córnea humana. Siendo las mismas las que cobran mayor relevancia clínica [9].

A partir de este desarrollo se desarrolló un algoritmo en LabVIEW™ de National Instruments™ para la generación de las imágenes como se muestra en la figura 6.

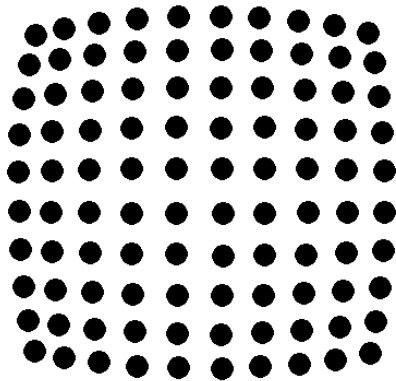


Figura 6. Placa de Hartmann generada computacionalmente.

Con el desarrollo de estas imágenes se pudo llevar a cabo el desarrollo de una herramienta para ordenar y etiquetar los puntos en correlación con su respectiva pantalla de Hartmann.

Partiendo de la premisa para el análisis de imágenes por medios computacionales [10] donde se explica que las imágenes son analizadas desde su esquina superior izquierda, tomando primero una dirección en x de izquierda a derecha y posteriormente una dirección en y de arriba hacia abajo.

Se optó por dividir los datos de las coordenadas de los distintos centroides en un número de subconjuntos igual a la raíz cuadrada del número de puntos. Estos subconjuntos se componían por un número de datos igual a la raíz cuadrada del total del número de centroides, siendo listadas las coordenadas en orden ascendente basados únicamente en su posición en y. Aquellos que estaban ubicados en una posición superior pasaron a formar parte de un primer subconjunto. Una vez delimitado este primer subconjunto, se ordenó de menor a mayor según su coordenada en x, siendo el menor aquel que estuviese posicionado más próximo al borde izquierdo de la imagen.

Este proceso se llevó a cabo con los datos restantes hasta que fueron formados todos los subconjuntos, cada dato fue etiquetado de acuerdo a su posición en cada subconjunto y correlacionado con las coordenadas de los centroides de la pantalla Hartmann correspondiente.

3. RESULTADOS.

Las imágenes obtenidas mediante el algoritmo desarrollado fueron generadas para RMS de $1\mu\text{m}$ a $-1\mu\text{m}$ en intervalos de 0.01 μm para todas las aberraciones, esto debido a que la bibliografía reportaba como máximo valores RMS $\pm 0.6341\mu\text{m}$ para la aberración de astigmatismo, siendo esta última la que clínicamente alcanzaba valores más altos y por tanto fijaba un estándar más comprometedor para la evaluación del resto de las aberraciones [11].

Los resultados fueron imágenes etiquetadas, en la tabla 2 se muestran los intervalos en los cuales se validaron los resultados con el propósito de determinar si el modelo propuesto cumplía con su propósito en los valores requeridos para topografía corneal (Figura 7).

Tabla 2. Intervalos del valor RMS en los cuales se caracterizo la herramienta de correlación.

Aberración	Resultados óptimos	Resultados no concluyentes.
Defoco	$1\mu\text{m}$ a $-1\mu\text{m}$	-
Astigmatismo	$1\mu\text{m}$ a $-1\mu\text{m}$	-
Coma	$1\mu\text{m}$ a $-1\mu\text{m}$	-
Esféricidad	$1\mu\text{m}$ a $0.91\mu\text{m}$ $0.79\mu\text{m}$ a $-1\mu\text{m}$	$0.9\mu\text{m}$ a $0.8\mu\text{m}$

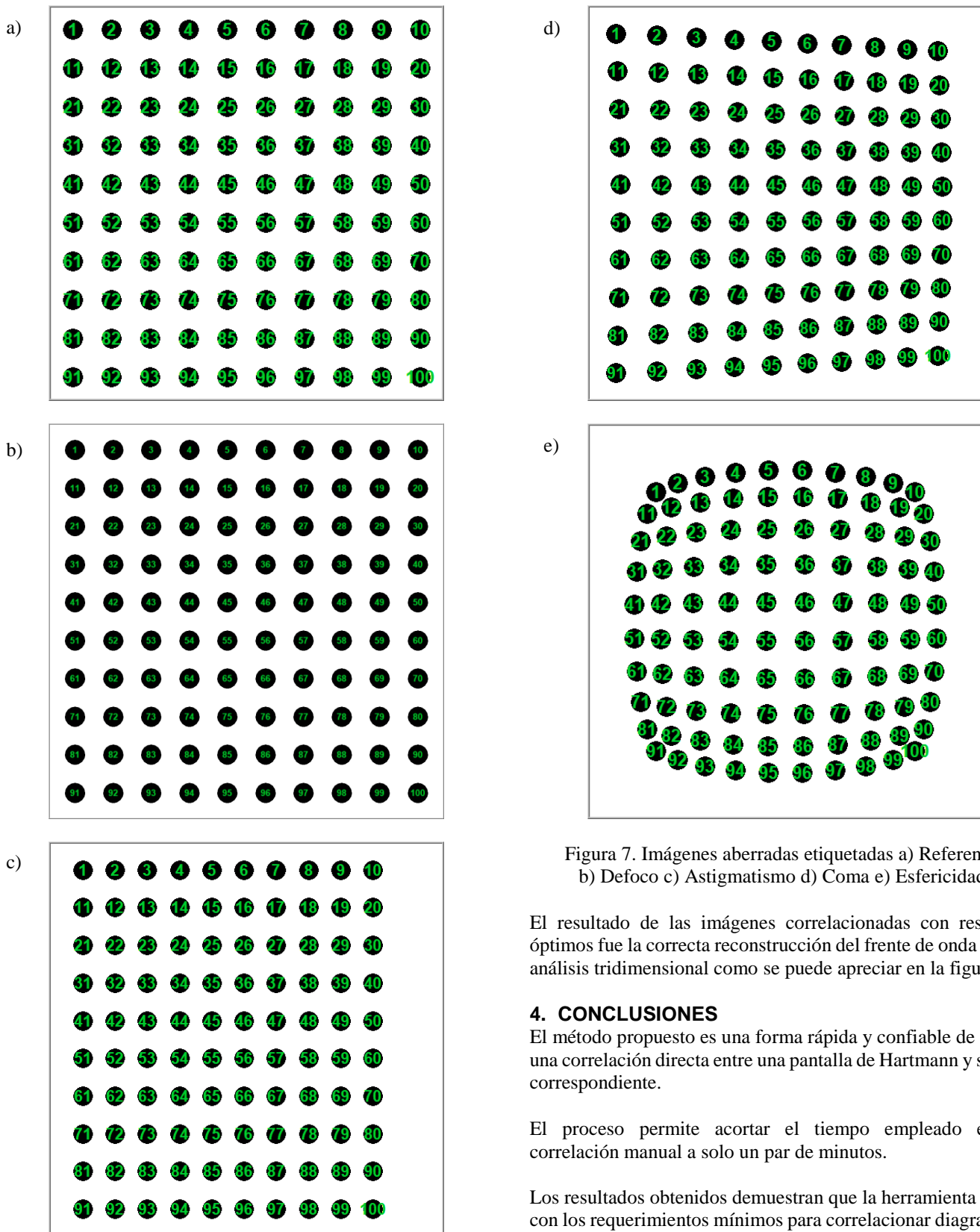


Figura 7. Imágenes aberradas etiquetadas a) Referencia b) Defoco c) Astigmatismo d) Coma e) Esfericidad.

El resultado de las imágenes correlacionadas con resultados óptimos fue la correcta reconstrucción del frente de onda para un análisis tridimensional como se puede apreciar en la figura 8.

4. CONCLUSIONES

El método propuesto es una forma rápida y confiable de obtener una correlación directa entre una pantalla de Hartmann y su placa correspondiente.

El proceso permite acortar el tiempo empleado en una correlación manual a solo un par de minutos.

Los resultados obtenidos demuestran que la herramienta cumple con los requerimientos mínimos para correlacionar diagramas de

las aberraciones con relevancia clínica, en el futuro se propone el validar el método con imágenes que supongan la combinación de 2 o más aberraciones además de ser probadas con límites mayores para los valores de RMS. Con lo cual se espera que la herramienta pueda ser empleada no solo para topografía corneal, si no para todo tipo de superficies reflectoras.

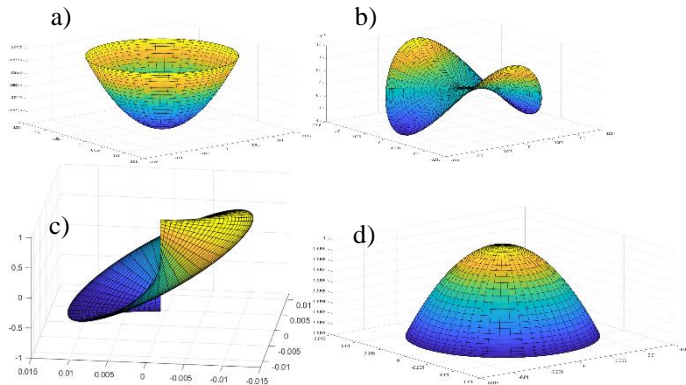


Figura 8. Imágenes tridimensionales aberradas a) Defoco b) Astigmatismo c) Coma d) Esfericidad.

Se propone como una opción para aplicaciones en mediciones de tiempo real la combinación con un sistema para la variación de la distancia focal como es el caso de los lensómetro. Esto permitiría tener imágenes con distintas distancias de captura logrando así obtener imágenes para distintas aberraciones con una mayor tasa de éxito y ya que el mismo programa tiene la posibilidad de tomar en cuenta estas variaciones, se lograrían mejores resultados con sistemas sencillos de implementación.

5. AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Chihuahua por el apoyo y las facilidades del uso del campus. S. Urita-Aguirre agradece al CONAHCyT por su apoyo a proporcionar una beca escolar.

6. REFERENCIAS.

- [1] D. Malacara-Hernández & D. Malacara-Doblado, "What is a Hartmann test?," APPLIED OPTICS, vol. 54, no. 9, Mar. 2015.
- [2] D. Malacara, "Teoría de aberraciones," en Óptica Básica, 1ra ed., CDMX: Secretaría de educación pública fondo de cultura económica México, 1989, cap. 5.
- [3] J. M. Jalife, G. Trujillo, P. G. Mendoza, D.P. Salas, M. Anguiano, L. F. Corral & N. Tornero, "Inverse Hartmann test for radius of curvature measurement in a corneal topography calibration sphere," Rev. Sci. Instrum., vol. 93, Mar. 2022, no. 043101, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0080572>
- [4] Y. Mejía, "El frente de onda y su representación con polinomios de Zernike," Cienc Tecnol Salud Vis Ocul, vol. 9, no. 2, Ene. 2011.
- [5] M. Ares, "Técnicas de reconstrucción y compensación activa de frentes de onda complejos," Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa, 2009.
- [6] C. Solomon & T. Breckon, "Representation," en Fundamentals of digital image processing, 1ra ed. Inglaterra: John Wiley & Sons, 2011, cap 1.
- [7] D. Malacara, "Hartmann, Hartmann-Shack, and Other Screen Tests," en Optical Shop Testing, 3era ed. Hoboken, New Jersey, USA: 2007, cap. 10.
- [8] D. Malacara, "Review and comparison of different representations of Zernike polynomials", AJP. Asian Journal of physics, vol 31, no. 6, pp. 747 -769, Jun 2022, ISSN : 0971 - 3093
- [9] T. Salmon, C. van del Pol, "Normal-eye Zernike coefficients and root-mean-square wavefront errors", JCRS. Journal of Cataract & Refractive Surgery, vol 32, pp. 2064 - 2074, Dec 2006, DOI: 10.1016/j.jcrs.2006.07.022
- [10] ni vision concepts help, National Instruments Corporation, USA, 2021, pp. 4-210.
- [11] J. Kelly, T. Mihashi, H. Howland, "Compensation of corneal horizontal/vertical astigmatism, lateral coma, and spherical aberration by internal optics of the eye.," Journal of Vision, vol. 4, pp. 264-271, June. 2004, ISSN: 1534-7362