

Dynamic contact angle measurement in soft contact lenses exposed to maintenance solutions using the optical edge detection method

Medición del ángulo de contacto dinámico en lentes de contacto blandos expuestos a soluciones de mantenimiento mediante el método óptico de detección de bordes

Juan J. Barrios^{1*}, Lizette D. Jaimes², Daniela S. Rueda²

1. Grupo Interdisciplinario de Investigaciones Epidemiológicas en el Sistema Visual, Tutor Semillero de Física Óptica, Universidad Santo Tomás, Carrera 18 No. 9-27, Bucaramanga, Santander, Colombia

2. Semillero de Física Óptica, Universidad Santo Tomás, Carrera 18 No. 9-27, Bucaramanga, Santander, Colombia

(*) E-mail: juan.barrios01@ustabuca.edu.co

Received: 30/07/2025 Accepted: 28/08/2025
DOI: 10.7149/OPA.58.3.51221

ABSTRACT:

Soft contact lenses are optical devices that interact directly with the ocular surface, including the cornea and conjunctiva. This constant interaction has driven research efforts by pharmaceutical and optical companies, focusing on improving material quality, among other aspects, to optimize the ocular environment and performance of these lenses. The availability of optoelectronic tools capable of determining the degree of contact lens material wettability would significantly complement ongoing studies related to the comfort and function of these devices. The present study focused on the implementation of an optoelectronic device and a digital titrator for the controlled application of drops from two types of maintenance solutions. Through digital image processing and the application of the optical edge detection method, the aim was to determine the dynamic contact angle variation of these solutions on the contact lens surfaces.

Key words: Soft contact lenses; Dynamic contact angle; Sessile drop method; Edge detection.

RESUMEN:

Los lentes de contacto blandos son dispositivos ópticos que interactúan directamente con la superficie ocular, incluyendo la córnea y la conjuntiva. Esta interacción constante ha impulsado la investigación por parte de compañías farmacéuticas y ópticas, enfocándose en la mejora de la calidad de los materiales, entre otros aspectos, con el fin de optimizar el ambiente y el rendimiento de estos lentes. Contar con herramientas optoelectrónicas capaces de determinar el grado de humectación del material de los lentes de contacto complementaría significativamente los estudios relacionados con el confort y el funcionamiento de dichos dispositivos. El presente estudio se enfocó en la implementación de un dispositivo optoelectrónico y un titulador digital para la aplicación controlada de gotas de dos tipos de soluciones de mantenimiento. Mediante el procesamiento digital de imágenes y la aplicación del método óptico de detección de bordes, se buscó determinar la variación del ángulo de contacto dinámico de estas soluciones sobre las superficies de los lentes de contacto.

Palabras clave: Lentes de contacto blandos; Ángulo de contacto dinámico; Método de la gota sésil; Detección de bordes.

REFERENCES AND LINKS / REFERENCIAS Y ENLACES

- [1] A. Soto Rondan, «Agentes humectantes en disoluciones de mantenimiento y conservación para lentes de contacto blandas», Trabajo final de grado, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/180756>
- [2] S. M. García Ramirez, *Lentes de contacto: teoría y práctica*, 1.^a ed., vol. 1. Bogotá: 2015, 2015.
- [3] D. C. Castiblanco Baranza, «Identificación de los depósitos microbiológicos en lentes de contacto blandos», Trabajo de grado, Universidad de la Salle, Bogotá, 2007. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.lasalle.edu.co>
- [4] J. Fernández González, «Avances en tecnología farmacéutica: lentes de contacto de hidrogel», Trabajo fin de grado, Universidad Complutense, Madrid, 2023. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/15333>
- [5] A. Moreno, J. Schuster, J. Manzur, M. Rosenberger, y C. Schvezov, «Modelo de la evaporación de una gota sésil sobre una superficie sólida», *III Jornadas del Departamento de Matemáticas*, vol. 1, pp. 55-58, ago. 2019, Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12219/3109>
- [6] K. A. Sornoza Morán, «Agentes humectantes en disoluciones de mantenimiento y conservación para lentes de contacto RGP», Trabajo final de grado, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2017. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/180758>
- [7] C. L. Saona Santos, *Contactología clínica*, 2.^a ed., vol. 1. Barcelona: 2001, 2002.
- [8] J. Torrent Burgués, «Medida del ángulo de contacto», Barcelona, ene. 2013. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/17638>
- [9] Á. Rodríguez García Cebadera, «Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales», Proyecto fin de carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, 2010. Accedido: 28 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10016/10046>
- [10] L. A. Ortiz, R. Escudero, y F. Rao, «El ángulo de contacto y su relación con las propiedades superficiales en un sistema orgánico-líquido-gas», *AFINIDAD LXXIX*, vol. 79, Michoacán, pp. 232-238, enero de 2022. Accedido: 29 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/397432>.
- [11] A. Arvay *et al.*, «Characterization techniques for gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells – A review», *J Power Sources*, vol. 213, pp. 317-337, sep. 2012.
- [12] H. Tian y M. Wang, «Electrokinetic mechanism of wettability alternation at oil-water-rock interface», *Surf Sci Rep*, vol. 72, n.º 6, pp. 369-391, dic. 2017.
- [13] R. M. Fillion, A. R. Riahi, y A. Edrisy, «A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering», *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 797-809, 2014.
- [14] K. K. Singh, M. K. Bajpai, y R. K. Pandey, «A novel approach for edge detection of low contrast satellite images», en *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2015, pp. 211-217.
- [15] T. Hermosilla, E. Bermejo, A. Balaguer, y L. A. Ruiz, «Detección de bordes con precisión subpíxel en imágenes digitales: Interpolación lineal frente a esquemas de tipo no lineal», pp. 9-0, nov. 2006.
- [16] N. Kushwaha, «Edge Detection using Fuzzy Logic in Matlab», 2012. [En línea]. Disponible en: www.ijarcsse.com
- [17] J. Vasquez Feijoo, «LOCALIZACION EFICIENTE EN DETECCION DE BORDES EN IMAGENES ADAPTANDO EL ALGORITMO ABC», mar. 2016.
- [18] A. García Arellano, «Adelgazamiento y Detección de Bordes de Objetos en Imágenes Digitales Usando Conjuntos Difusos», Tonantzintla, Puebla, oct. 2007.
- [19] Y. Shang, X. Sun, X. Yang, X. Wang, y Q. Yu, «A camera calibration method for large field optical measurement», *Optik (Stuttg)*, vol. 124, n.º 24, pp. 6553-6558, dic. 2013.



- [20] R. Melo, J. P. Barreto, y G. Falcao, «A New Solution for Camera Calibration and Real-Time Image Distortion Correction in Medical Endoscopy–Initial Technical Evaluation», *IEEE Trans Biomed Eng*, vol. 59, n.º 3, pp. 634-644, mar. 2012.
- [21] J. Bustamante Mejia y R. López Varona, «Calibración de Cámara Termográfica Fluke TI-32 Thermographic camera calibration FLUKE TI-32 Investigadora 2013-2014 por el grupo de electrofisiología», *Scientia et Technica Año XIX*, vol. 19, n.º 1.
- [22] Bausch + Lomb Incorporated, «Soflens 59», <https://www.bausch.com.es/productos/lentes-de-contacto/miopia-o-hipermetropia/soflensr-59/>.
- [23] Alcon Inc., «Air Optix Aqua», <https://www.myalcon.com/pe/professional/contact-lenses/monthly/air-optix-aqua/>.

1. Introducción

Los lentes de contacto (LC) son dispositivos ópticos que, a diferencia de las lentes oftálmicas, se posicionan directamente sobre la superficie ocular, entre el párpado y la córnea. Están diseñados para corregir errores refractivos y, además, ofrecen una visión periférica superior respecto a las lentes oftálmicas [1]. Estructuralmente, los LC se definen como un casquete esférico compuesto por dos radios de curvatura diferenciados. Su cara anterior convexa es de particular importancia dióptrica, dado que la mayor parte de su poder correctivo reside en la refracción a través de esta superficie. Por otro lado, la cara posterior cóncava es crucial desde una perspectiva optométrica y de adaptación, ya que es la porción que se ajusta a la superficie anterior de la córnea [2].

Los LC blandos son actualmente los más utilizados, siendo fabricados principalmente a partir de hidrogeles de silicona (p. ej., galifilcón, senofilcón, comfilcón, lotrafilcón y enfilcón). Estos materiales presentan distintas propiedades físicas, químicas y estructurales que confieren características particulares, como la hidrofiliidad, definida como la capacidad del material para incorporar agua en un rango que oscila entre el 35% y el 80% [3], [4], [5]. Un mayor contenido acuoso en el lente se correlaciona directamente con una mayor permeabilidad al oxígeno, facilitando su transporte hacia la córnea. Adicionalmente, los polímeros de hidrogel otorgan a los lentes blandos otras propiedades esenciales como hidratación, porosidad, transmisibilidad al oxígeno, humectabilidad superficial y durabilidad [5].

El creciente uso de LC blandos ha conllevado la aparición de problemas relacionados con la formación de depósitos en su superficie, lo que incrementa el riesgo de contaminación ocular y sus consecuencias clínicas [3]. Para mitigar estos riesgos, se han desarrollado sistemas de mantenimiento específicamente diseñados para garantizar una desinfección e hidratación adecuadas de los lentes. En el presente estudio, se utilizaron las soluciones multiusos Opti-Free Pure Moist (Alcon) y BioTrue (Bausch+Lomb), seleccionadas por su reconocida facilidad y seguridad de uso, así como por su capacidad para mantener la isotonicidad necesaria con la lágrima [6].

En términos fisicoquímicos, la humectabilidad superficial se define como la capacidad de un líquido para adherirse a una superficie sólida. Este fenómeno da lugar a la formación de un ángulo de humectación, cuya variabilidad está influenciada por el equilibrio entre las fuerzas de adhesión (que promueven la extensión del líquido sobre el sólido) y las fuerzas de cohesión (que tienden a que el líquido se agrupe, impidiendo su esparcimiento) [7]. El ángulo de contacto se forma en el punto donde convergen tres interfaces: sólido-líquido, líquido-vapor y sólido-vapor, siendo su vértice el punto de encuentro de estas tres fases (ver figura 1). Este ángulo constituye un parámetro fundamental para caracterizar las propiedades de hidrofiliidad y humectación superficial de los materiales [8]. Particularmente en el caso de los LC blandos, se observa un ángulo de contacto dinámico, ya que el líquido puede penetrar y ser absorbido por el material, resultando en un ángulo que varía en función del tiempo [7]. Para la determinación del ángulo de contacto dinámico, es esencial capturar una secuencia de imágenes durante la interacción entre la solución (líquido) y la muestra sólida de estudio [9].

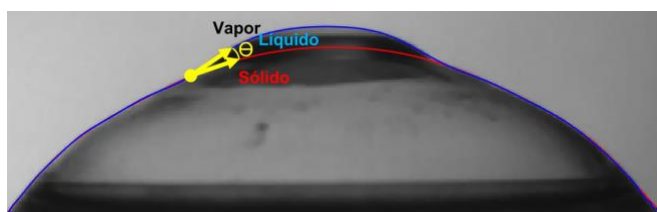


Fig.1. Esquema representativo de las tres interfaces presentes en ángulo de contacto.

Entre los métodos empleados para medir los ángulos de humectación se encuentra el método de la gota sésil, el cual permite determinar el ángulo de contacto formado entre la superficie de la lente y la tangente a una gota de líquido depositada sobre ella [7]. La intersección de estas interfaces da lugar a la formación de la línea de contacto o línea de triple fase [5]. Para la determinación de estas medidas, es necesario contar con dispositivos optoelectrónicos específicos, que suelen incorporar software intrínseco para el procesamiento digital de las imágenes o videos adquiridos.

En la presente investigación, se implementó un sistema experimental compuesto por una cámara CCD UEye UI-2310-M equipada con un objetivo Edmund Optics #59871 para la adquisición de videos, una plataforma de posicionamiento para las muestras, un titulador digital para la aplicación controlada de las gotas sobre los lentes de contacto blandos, y un sistema de iluminación dimerizable con difusor, entre otros componentes esenciales, tal como se esquematiza en la figura 2. Si bien este sistema no es completamente telecéntrico, el objetivo de microscopio, la corta distancia de trabajo y el control de la iluminación en contraluz permitieron obtener imágenes de alta calidad con bordes bien definidos para el procesamiento digital. Para el procesamiento digital de las imágenes capturadas, se empleó la técnica de detección de bordes con el fin de determinar la variación dinámica del ángulo de contacto en los LC blandos.

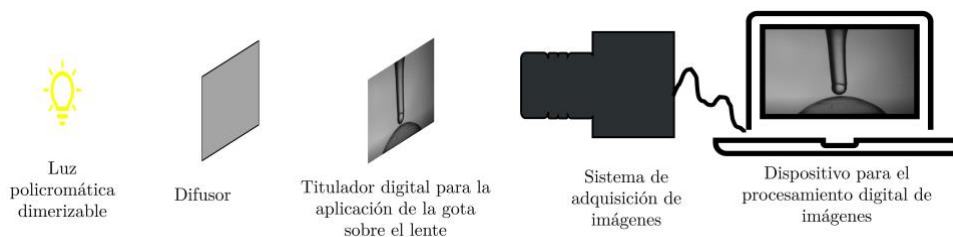


Fig.2. Esquema del montaje implementado

2. Ángulo de contacto

Entre los métodos empleados para evaluar la humectabilidad de un líquido depositado sobre una superficie sólida, se destaca el ángulo de contacto. Dicho ángulo se define como el formado entre la superficie del sólido y la tangente a la gota de líquido en el punto donde se encuentran las fases líquido, vapor y sólido. Este parámetro es inversamente proporcional a la humectabilidad, es decir, ángulos de contacto mayores indican una menor humectabilidad, lo que se traduce en una menor extensión del líquido sobre la superficie [8].

Dentro de esta clasificación, se distinguen el ángulo de contacto estático y el ángulo de contacto dinámico. El ángulo de contacto estático se forma cuando el líquido no penetra la superficie y permanece en reposo, presentando un valor constante (generalmente mayor a 90° para superficies hidrofóbicas). En contraste, el ángulo de contacto dinámico se observa cuando el líquido interactúa con la superficie mediante penetración o absorción, resultando en un ángulo que varía en función del tiempo. A su vez, el ángulo de contacto dinámico se subdivide en dos tipos: el ángulo de contacto de avance, determinado a medida que el líquido se extiende sobre la superficie sólida; y el ángulo de contacto de retroceso, medido cuando el líquido es retirado de la superficie del sólido [10].

Entre las técnicas disponibles para medir el ángulo de contacto, se encuentran el método de la gota sésil, la burbuja cautiva y la placa de Wilhelmy. El método de la gota sésil, específicamente, consiste en la medición del ángulo de contacto formado entre un líquido y una superficie sólida a partir de una gota depositada sobre ella. Para la obtención de resultados precisos con esta técnica, es crucial que el tamaño de la gota sea pequeño, a fin de minimizar la alteración del ángulo de contacto debido a su propio peso [11].

Es importante destacar que el método de la gota sésil empleado en esta investigación se aplicó sobre superficies de polímeros hidratados, específicamente lentes de contacto blandos. Debido a la naturaleza intrínseca de estos materiales, caracterizada por su permeabilidad, los tiempos de medición debían ser relativamente cortos. Una exposición prolongada de la gota a la superficie del material podría inducir fenómenos de absorción, afectando la estabilidad de la gota y, consecuentemente, generando variaciones en la medición del ángulo de contacto dinámico.

2.a. Técnicas y ecuaciones para la medición del ángulo de contacto

Para la determinación del ángulo de contacto, se emplean diversas estrategias y modelos matemáticos. Entre ellos, destaca la ecuación de Young, la cual permite relacionar el ángulo de contacto de un líquido sobre una superficie sólida con las tensiones interfaciales. Esta ecuación considera el equilibrio de las fuerzas superficiales en la línea de triple fase, según se muestra en la ecuación (1), [12]:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_s - \gamma_{s/L}}{\gamma_L} \quad (1)$$

Donde γ_s representa la tensión superficial del sólido, γ_L la tensión superficial del líquido, y $\gamma_{s/L}$ la tensión interfacial sólido/líquido. Una disminución en el ángulo de contacto implica un aumento en la humectación [8].

Debido a que la ecuación de Young no considera la rugosidad de la superficie, a menudo se utilizan otros modelos para superficies no ideales, como la ecuación de Wenzel, presentada en la ecuación (2), donde θ^W representa el ángulo de contacto aparente o ángulo de contacto de Wenzel, r es el factor de rugosidad de la superficie y θ^Y es el ángulo de contacto de Young. [12]

$$\cos \theta^W = r \cos \theta^Y \quad (2)$$

Cuando el ángulo de contacto se forma sobre una superficie compuesta por fases sólida y de aire, y el líquido no penetra completamente los poros debido a su repelencia inherente, dejando aire atrapado en la morfología de la rugosidad, se utiliza la ecuación de Cassie, ecuación (3), [13]:

$$\cos \theta^C = f_1 \cos \theta_1^Y + f_2 \cos \theta_2^Y \quad (3)$$

Finalmente, la ecuación de Cassie-Baxter, mostrada en la ecuación (4), se emplea cuando un líquido reposa sobre una superficie sólida texturizada con aire ocluido debajo [13]:

$$\cos \theta^{CB} = f_1 \cos \theta^Y - f_2 \quad (4)$$

3. Método de detección de bordes

La detección de bordes ha sido objeto de extensos análisis en el campo de la visión por computadora y el procesamiento de imágenes, con los primeros algoritmos introducidos ya en 1971 [14]. En el procesamiento digital de imágenes, un borde se define como una región donde se produce un cambio abrupto en la intensidad del nivel de gris entre píxeles adyacentes. Su detección es fundamental en diversas disciplinas, incluyendo cartografía y medicina, para preservar propiedades estructurales importantes o para distinguir formas y reconocer objetos dentro de una imagen [15], [16].

Este proceso implica la identificación y localización de discontinuidades agudas en la imagen, las cuales corresponden a cambios súbitos en la intensidad de los píxeles que delimitan los objetos en una escena. La detección de bordes se realiza típicamente mediante una medición de primera derivada, seguida de una comparación con un umbral para clasificar si un píxel pertenece o no a un borde. El resultado es una imagen binaria que contiene únicamente los píxeles de los bordes detectados, como se ilustra en la figura 3 [16].



Fig. 3. Técnica de detección de bordes, coordenadas de los píxeles del borde detectado

Se han propuesto y desarrollado numerosos métodos de detección de bordes a múltiples escalas. Entre los algoritmos más populares se encuentran los de Sobel, Roberts, Prewitt, los filtros de respuesta de impulso finito con Kernel, Canny, Shen y Deriche, así como la derivada de la función gaussiana, entre otros. En la figura 4 se presenta un ejemplo de detección de bordes en una misma imagen utilizando algunos de los métodos mencionados.

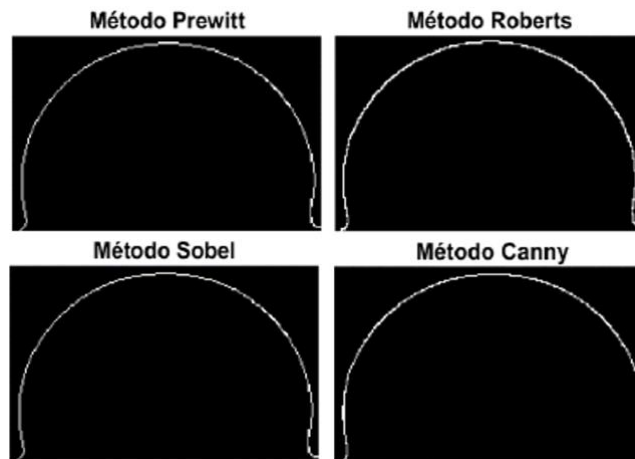


Fig. 4. Detección del borde de la misma muestra a través de los métodos Prewitt, Roberts, Sobel y Canny

En la presente investigación, se implementó el método de Sobel para la detección de bordes. Este algoritmo fue seleccionado debido a que los resultados obtenidos con su aplicación fueron satisfactorios, lo que hizo innecesario el uso de otras estrategias. A continuación, se proporciona una descripción detallada del método de Sobel, sin desestimar la aplicabilidad de los demás operadores mencionados [14].

3.a. Método de Sobel

El método de Sobel es un operador de gradiente basado en la derivada de primer orden. Este método realiza una convolución entre la imagen original y un par de máscaras (kernels) para generar una imagen de gradiente. La detección de bordes se logra identificando los valores máximos y mínimos de intensidad en la vecindad de cada píxel, y subsiguientemente, determinando si dicho píxel corresponde a un borde mediante la aplicación de un parámetro umbral [17].

Los operadores de Sobel consisten en un par de máscaras de convolución de 3×3 . Estas máscaras, que se muestran en la expresión matricial (5), están diseñadas para detectar el gradiente de intensidad en las direcciones horizontal x y vertical y , respectivamente [17], [18].

$$x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & +1 \\ -2 & 0 & +2 \\ -1 & 0 & +1 \end{pmatrix} \quad y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ +1 & +2 & +1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Estos operadores enfatizan los píxeles centrales, lo que confiere al método una mayor isotropicidad y robustez, aunque con un costo computacional ligeramente superior [17], [18].

4. Calibración del Sistema

Se llevó a cabo la calibración del sistema óptico implementado, el cual consistió en una cámara CCD UEye UI-2310-M, equipada con un sensor Sony ICX098BQ, con una resolución de 1280 x 1024 píxeles y un tamaño de píxel físico de 4.8 x 4.8 μm . La cámara se acopló a un objetivo de visión artificial Edmund Optics #59781 de 12 mm, de focal fija y montura C-Mount, diseñado para formatos de sensor de 2/3 pulgadas (círculo de imagen de 11 mm), que ofrece control manual de enfoque y diafragma. Las características y las descripciones se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. Características y descripción del sistema óptico implementado

Característica	Descripción/valor
Cámara	UEye UI-2310-M
Sensor	Sony ICX098BQ
Resolución	1280 x 1024 píxeles
Tamaño del píxel físico	4.8 x 4.8 μm
Lente	Edmund Optics #59781 (12 mm)
Velocidad de captura	25 fotogramas por segundo (fps)
Intervalo de procesamiento	Cada 3 fotogramas
Tiempo de análisis	0.12 segundos

La calibración intrínseca del sistema cámara-lente se realizó aplicando el método de Zhang [19], utilizando para ello la Toolbox de calibración de cámara de MATLAB. Para este proceso, se empleó un patrón de calibración tipo tablero de ajedrez, impreso con alta precisión y con un tamaño de cuadro de 2.0 x 2.0 mm de lado, como se puede apreciar en la figura 5.

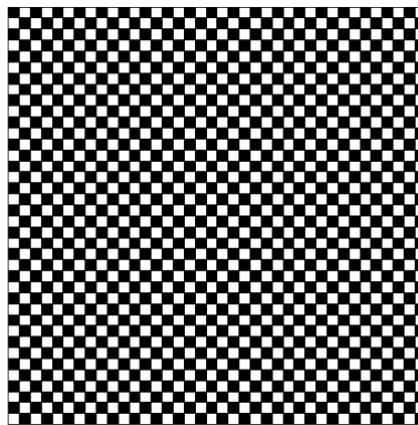


Fig. 5. Cuadrículas tipo tablero de ajedrez para la calibración del sistema óptico

Durante el proceso de calibración, se capturó un total de 15 imágenes del patrón desde diversas orientaciones y distancias. Esta estrategia aseguró una cobertura adecuada del campo de visión y permitió una estimación robusta de los parámetros, según se ilustra en la figura 6.

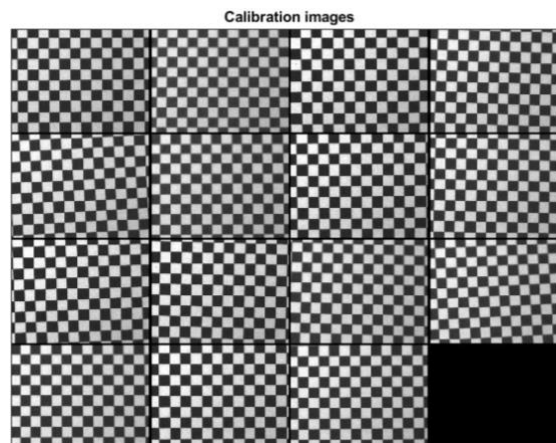


Fig. 6. Lectura de las 15 posiciones de las cuadrículas

El proceso de calibración implicó la detección precisa de las esquinas del patrón de cuadrícula. Para ello, se seleccionaron 9 cuadrículas horizontales y 7 verticales en cada una de las imágenes capturadas, verificando que las esquinas coincidieran de manera óptima. Una vez finalizado el proceso, el sistema visualizó la selección de las esquinas según los píxeles de trabajo determinados.

A partir de los parámetros extrínsecos, se obtuvo la posición y orientación de cada patrón de calibración en un espacio tridimensional. Los parámetros intrínsecos del sistema de adquisición de imágenes, determinados mediante esta calibración, se detallan a continuación:

4.a. Matriz intrínseca

$$K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4997.51 & 0 & 295.23 \\ 0 & 5012.52 & 443.83 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Donde f_x y f_y representan las focales efectivas en píxeles, con incertidumbres de ± 427.58 y ± 431.16 píxeles, respectivamente. Las coordenadas del punto principal (c_x, c_y) fueron (295.23, 443.83) píxeles, con incertidumbres de ± 38.35 y ± 67.68 píxeles. Cabe destacar que el punto principal mostró un desplazamiento con respecto al centro geométrico del sensor (640, 512) de la cámara UEye UI-2310-M. Este desplazamiento subraya la importancia de la calibración intrínseca, ya que permite corregir las distorsiones inherentes al montaje experimental y garantizar la precisión de las mediciones geométricas.

4.b. Coeficientes de distorsión

Los coeficientes de distorsión radial obtenidos para el objetivo Edmund Optics #59781 fueron $k_1 = -0.6264$, $k_2 = 43.871$ y $k_3 = 0.0000$. Por su parte, los coeficientes de distorsión tangencial resultaron ser $p_1 = -0.0017$ y $p_2 = -0.0054$. El sesgo (α) entre los ejes de píxeles fue de 0.00, lo que confirma su ortogonalidad. Es relevante mencionar que el coeficiente k_2 presentó una incertidumbre considerablemente alta de ± 38.71 .

4.c. El error de Reproyección

El error de reproyección promedio (RMS) para la calibración del sistema fue de 0.306 píxeles. Este bajo error de reproyección promedio valida la alta precisión de la calibración del sistema de adquisición de imágenes, compuesto por la cámara CCD UEye UI-2310-M y el objetivo Edmund Optics #59781 [19], [20], [21]. Este resultado es fundamental, ya que asegura la fiabilidad de las mediciones cuantitativas realizadas en las imágenes capturadas para la determinación del ángulo de contacto dinámico entre las soluciones de mantenimiento y la superficie de los lentes de contacto blandos.

La calibración del sistema, incluyendo la determinación de los parámetros intrínsecos de la cámara y los coeficientes de distorsión del objetivo, fue fundamental para mitigar las distorsiones geométricas inherentes al montaje experimental. Si bien estas correcciones eliminaron el error de las distorsiones radiales y tangenciales, es importante destacar que el sistema no es completamente telecéntrico. No obstante, el riguroso proceso de calibración, sumado a la implementación de un objetivo de microscopio y una corta distancia de trabajo, garantizó que la relación entre los píxeles de la imagen y las dimensiones reales del objeto fuera precisa y consistente en el campo de visión, compensando así los efectos de la no-telecentricidad y asegurando la validez de las mediciones angulares realizadas.

5. Tratamiento de la secuencia de las imágenes

Para cada medición experimental, se aplicó una gota de 0.06 ml en promedio sobre la superficie de los lentes de contacto utilizando el titulador digital. Tras la adquisición del video donde se registraba el desplazamiento de la gota sobre la superficie del lente de contacto, se procedió al procesamiento selectivo de los fotogramas (frames). El análisis se inició con el fotograma inmediatamente anterior al contacto de la gota con el lente, seguido del fotograma en el momento del contacto inicial. Posteriormente, se procesaron imágenes secuenciales capturadas cada 3 fotogramas, culminando el análisis cuando la gota se había extendido por toda la superficie del lente (ver figura 7).

Para el tratamiento digital de estas imágenes, se comenzó con la corrección de cada una, aplicando las transformaciones determinadas durante la calibración del sistema óptico.

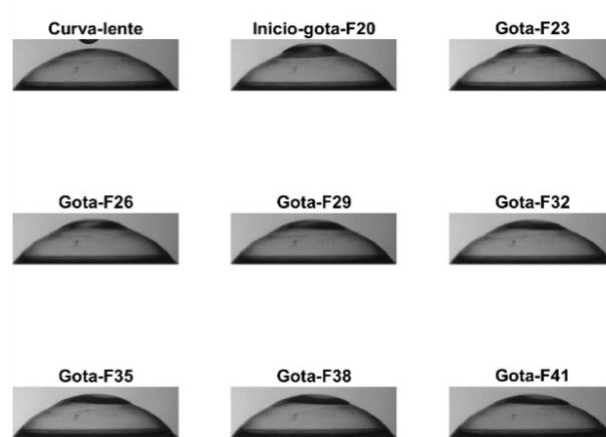


Fig. 7. Desplazamiento de la gota de la solución de mantenimiento sobre uno de los lentes de contacto blando

El procesamiento individual de cada imagen para la determinación del borde del lente se llevó a cabo implementando el método de Sobel. En la figura 8a se presenta la imagen original del lente, y en la figura 8b se muestra el borde detectado de dicha imagen mediante la aplicación del método de Sobel.

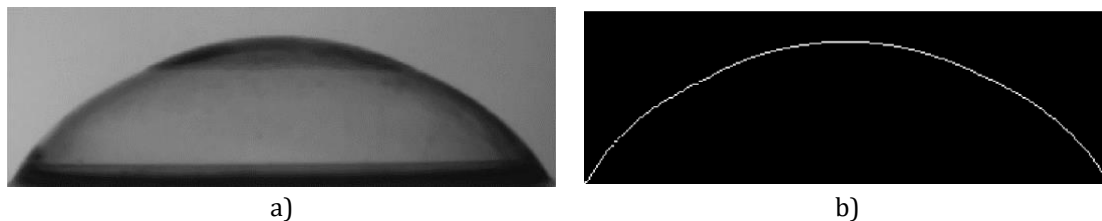


Fig. 8. a) Imagen del lente de contacto. b) Detección del borde del lente de contacto a través del método Sobel

A partir de las coordenadas de los píxeles del borde detectado, se determinó la función polinómica que mejor representaba la curvatura del borde de la gota. El orden de los polinomios que ofrecieron el mejor ajuste a estas curvaturas varió entre el cuarto y el sexto orden. La validez de cada ajuste se verificó comparando la función polinómica obtenida con la curvatura real del borde en la imagen. Estos ajustes de las funciones, mostrando la evolución de la forma de la gota sobre el lente, se ilustran en la figura 9.

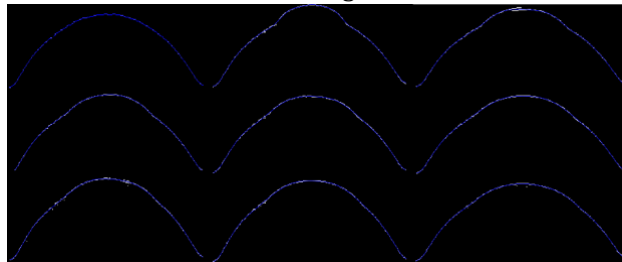


Fig. 9. Ajuste de la función polinómica sobre las curvaturas del lente de contacto y sobre la gota cuando esta se desplaza sobre dicho lente.

A medida que la gota se extendía sobre la superficie del lente, se observó su variación dinámica y su tendencia al aplanamiento. Dado que el procesamiento de las imágenes se realizó cada tres fotogramas, y considerando que los videos se capturaron con la cámara CCD a una velocidad de 25 fotogramas por segundo, el tiempo promedio estimado entre los análisis de la curvatura de la gota fue de aproximadamente 0.12 segundos. La representación gráfica simultánea de la curvatura del lente y de la gota sobre el lente en todos los fotogramas analizados permitió determinar los puntos de intersección de las curvaturas de las dos superficies en estudio (lente-gota), como se muestra en la figura 10.

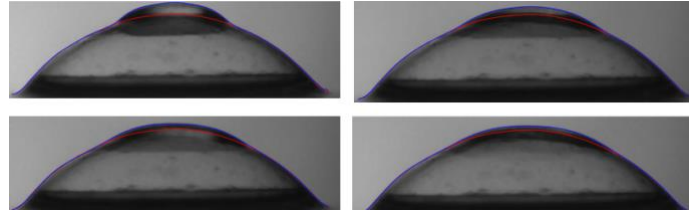


Fig. 10. Intersección de la curvatura del lente y la gota en cuatro instantes diferentes

Utilizando las coordenadas de los puntos de intersección de las curvaturas lente-gota, se procedió a determinar las ecuaciones de las rectas tangentes a las funciones polinómicas en dichos puntos, para cada instante de interés, tal como se presenta en la figura 11a. A partir de las pendientes de estas rectas tangentes, se calculó el ángulo entre ellas (figura 11b), un procedimiento que se repitió a medida que la gota se desplazaba sobre la superficie del lente.

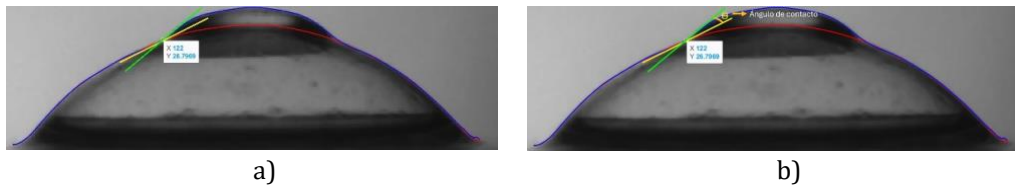


Fig. 11. a) Rectas tangentes a las curvas en el punto de intersección. b) Medida aproximada del ángulo de contacto entre la gota y la superficie del lente

6. Medida Aproximada del Ángulo Dinámico

Para la determinación del ángulo de contacto dinámico, se requirió la implementación del sistema optoelectrónico esquematizado en la figura 2, así como la estrategia de procesamiento digital de imágenes previamente detallada. Para ello, la interfaz líquido-aire de la gota fue extraída mediante procesamiento digital, y su forma en la cercanía del punto de triple contacto (sólido-líquido-vapor) fue ajustada a un polinomio de orden bajo. Si bien en la teoría el punto de contacto puede presentar una discontinuidad en la tangente, en la práctica, los métodos de procesamiento de imágenes miden un ángulo de contacto macroscópico o aparente que representa la humectabilidad global. El ajuste polinomial se aplicó a una pequeña región de la curva de la gota, cercana a la superficie, para mitigar el error de la discontinuidad y obtener una medida reproducible de la tangente. La precisión de este ajuste fue validada a través de las repetidas mediciones y la consistencia de los resultados obtenidos, lo que confirma la idoneidad del método para el objetivo del presente estudio. Una descripción del procedimiento que se realizó se presenta en el diagrama de la figura 12.

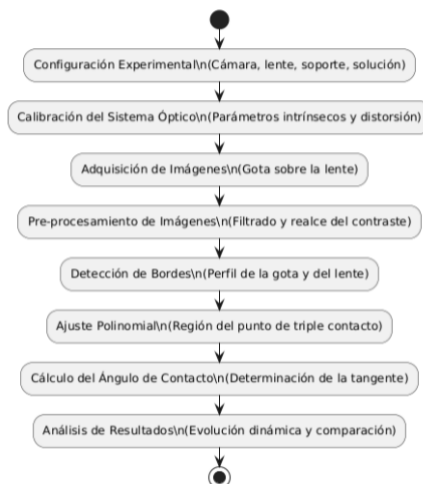


Fig.12. Proceso para determinar el ángulo dinámico

A diferencia de los métodos tradicionales que asumen perfiles de gota esféricos o se basan en la ecuación de Young-Laplace para superficies planas, la metodología implementada no requiere suponer una forma geométrica específica. Dado el volumen utilizado (aproximadamente 60 μl) y la curvatura del sustrato, el perfil de la gota se encuentra influenciado por la fuerza de la gravedad. Sin embargo, el método implementado aborda directamente esta condición real al emplear la detección de bordes y el ajuste de un polinomio a los datos experimentales de la interfaz aire-líquido. Esta aproximación permite una caracterización precisa del ángulo de contacto dinámico en el punto de triple contacto, sin necesidad de recurrir a modelos teóricos que podrían no ser aplicables a las condiciones específicas de la superficie curva y del volumen de la gota. La distinción entre los puntos del borde de la gota y la superficie sólida fue posible gracias a la calibración del sistema, que permitió definir el perfil de la lente como una referencia geométrica fija sobre la cual se proyecta la gota líquida para la medición.

La variación del ángulo de contacto observada en este estudio es, por definición, una medida de la humectabilidad dinámica, lo cual difiere del ángulo de contacto en equilibrio. A diferencia de las mediciones de equilibrio, que requieren un intervalo de tiempo para estabilizarse en una superficie plana y en condiciones de mínima energía, las mediciones dinámicas capturan la evolución temporal de la interacción sólido-líquido. En el presente estudio, la gota nunca llega a un equilibrio estático, lo que hace que la penetración y el esparcimiento del líquido sobre la superficie sean fenómenos inherentes al proceso y al material del lente. En relación con el perfil de la gota, si bien la curvatura de la lente ejerce una influencia, el esparcimiento del líquido no se debe principalmente a la pendiente geométrica, sino a la interacción fisicoquímica entre el líquido y la superficie del polímero. Las diferencias observadas en la velocidad de variación temporal del ángulo entre los lentes Soflens (hidrogel) y Air Optix (hidrogel de silicona) confirman que las propiedades del material son el factor determinante en la humectabilidad, tal como se discute en la literatura. Respecto a la clasificación de la humectabilidad, los valores de ángulo de contacto iniciales y finales obtenidos se encuentran dentro de los rangos característicos de materiales hidrofílicos, lo cual es fundamental para su uso en contactología. Si bien un ángulo de contacto inferior a 10° es comúnmente asociado con superficies superhidrofílicas en estudios con sustratos planos, para lentes de contacto, cualquier valor bajo de ángulo de contacto dinámico es indicativo de una excelente humectabilidad y cumplimiento con los estándares de la industria.

En el presente estudio, se utilizaron doce pares de lentes de contacto blandos de las marcas comerciales Soflens y Air Optix, a los cuales se les aplicaron las soluciones de mantenimiento Biotrue y Opti-Free. A medida que cada solución se extendía sobre la superficie de los lentes, se determinó el valor del ángulo entre la solución y el lente. La figura 13 muestra los valores de dicho ángulo en los instantes inicial y final del proceso para los lentes y la solución Biotrue.

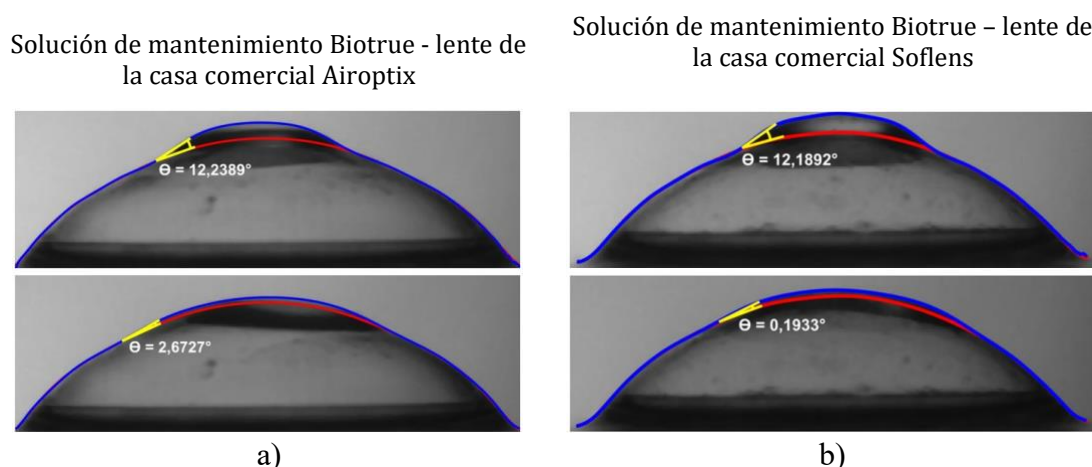


Fig.13. a) Ángulo de contacto inicial y final al aplicar la solución Biotrue sobre el lente Air Optix. b) Ángulo de contacto inicial y final al aplicar la solución Biotrue sobre el lente Soflens.

Análogamente, la figura 14 presenta la medida de dichos ángulos al aplicar la solución Opti-Free.

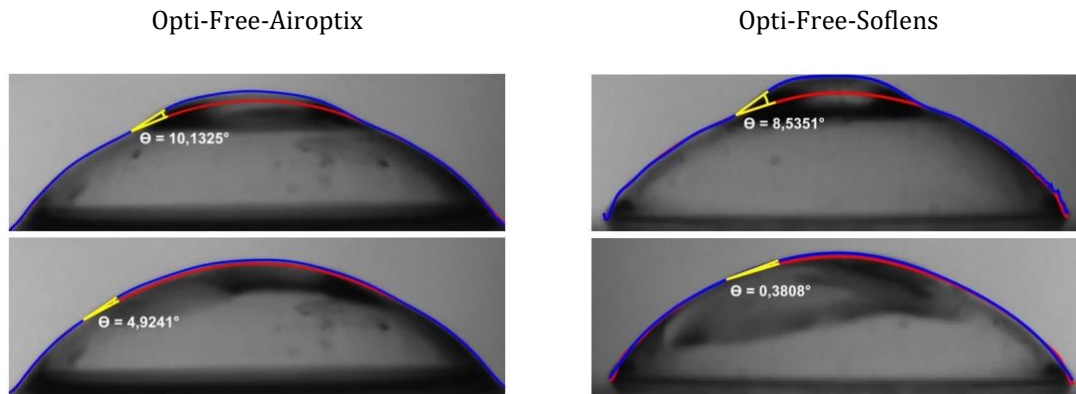


Fig.14. Ángulo de contacto inicial y final con la solución Opti-Free y los lentes de las compañías mencionadas anteriormente

Los valores angulares de contacto dinámico para cada lente fueron registrados en función de la marca del lente, la solución de mantenimiento empleada y su respectiva potencia esférica. La nomenclatura utilizada para identificar cada combinación específica se estandarizó como LC-Marca-Solución-PotenciaEsférica; por ejemplo, la denominación LC-AO-BT-+2.75 se refiere a un lente de contacto (LC) de la marca Air Optix (AO), al cual se aplicó la solución Biotrue (BT), con una potencia esférica de +2.75 dioptrías. Dado que el procesamiento de las imágenes se realizó cada tres fotogramas, y considerando que los videos se capturaron con la cámara CCD a una velocidad de 25 fotogramas por segundo, lo que equivale a un intervalo de 0.04 segundos por fotograma, el tiempo promedio estimado entre los análisis de la curvatura de la gota fue de aproximadamente 0.12 segundos, y su evolución se presenta gráficamente en las figuras correspondientes.

A partir de los resultados de ángulo de contacto dinámico obtenidos, se observó que los lentes de contacto Soflens (SF) exhibieron, en general, una mayor humectabilidad en comparación con los lentes Air Optix (AO). Esta diferencia podría estar asociada con la composición de sus materiales: los lentes Soflens se clasifican en la literatura como hidrogeles convencionales compuestos por Hilaflcon B con un 59% de contenido de agua [22], mientras que los lentes Air Optix están fabricados con silicona hidrogel Lotrafilcon B, con un contenido de agua del 33% [23]. Es fundamental destacar que, en el contexto de la humectabilidad de superficies, un ángulo de contacto elevado se asocia con una mayor hidrofobicidad del material, mientras que un ángulo reducido indica una mayor hidrofiliidad.

Los datos de ángulo de contacto dinámico para cada lente, con sus respectivas potencias esféricas, fueron promediados para generar una representación global del comportamiento de cada marca de lente. Este análisis de conjunto permitió visualizar la tendencia general de humectabilidad del material y su interacción con cada solución de mantenimiento, independientemente de la potencia esférica específica. A fin de facilitar la comprensión global de los hallazgos principales, los resultados más importantes del ángulo de contacto dinámico para cada combinación de lente y solución se resumen en la Tabla 2.

TABLA 2. Resumen de resultados de ángulo de contacto dinámico (valores promediados)

Lente	Solución	Ángulo Inicial Promedio (°) ± incertidumbre	Ángulo Final Promedio (°) ± incertidumbre	Observación clave
Air Optix	Biotrue	10.0 ± 1.4033	2.0 ± 1.4287	Mayor hidrofiliidad final
Air Optix	Opti-Free	10.2 ± 0.5932	3.0 ± 2.1108	Mayor ángulo inicial
Soflens	Biotrue	10.2 ± 3.6079	2.0 ± 0.6721	Ángulo inicial mayor
Soflens	Opti-Free	8.5 ± 3.2099	0.8 ± 1.1668	Mayor humectabilidad final

La dispersión observada en las mediciones del ángulo de contacto, reflejada en la desviación estándar, indica la sensibilidad del fenómeno a las condiciones experimentales y la variabilidad inherente al sistema de medición. Estos rangos de incertidumbre, aunque notables, proporcionan una estimación rigurosa del error experimental y confirman la naturaleza dinámica del ángulo de contacto. Es importante destacar que, a pesar de esta variabilidad en los valores absolutos, el método comparativo empleado en este estudio se

mantiene robusto, ya que todas las mediciones fueron realizadas bajo condiciones estandarizadas, permitiendo una comparación válida de la humectabilidad relativa entre los diferentes lentes y soluciones.

La figura 15 ilustra la evolución del ángulo de contacto dinámico para los lentes Air Optix en presencia de las soluciones Biotrue (BT) y Opti-Free (OF). Se observó que la solución Opti-Free indujo un ángulo de contacto inicial ligeramente superior (10.2°) en comparación con Biotrue (10.0°) al tiempo 0 segundos. No obstante, a partir de los 0.12 segundos, los lentes Air Optix acondicionados en Biotrue consistentemente exhibieron ángulos de contacto inferiores en comparación con Opti-Free. Al finalizar el período de medición (0.84 segundos), el ángulo de contacto para los lentes tratados con Biotrue se estabilizó en aproximadamente 2.0° , mientras que para Opti-Free el valor fue de 3.0° . Estos resultados sugieren que, para el material de Air Optix, la solución Biotrue facilita una mayor hidrofiliidad superficial terminal y una humectación más eficiente.

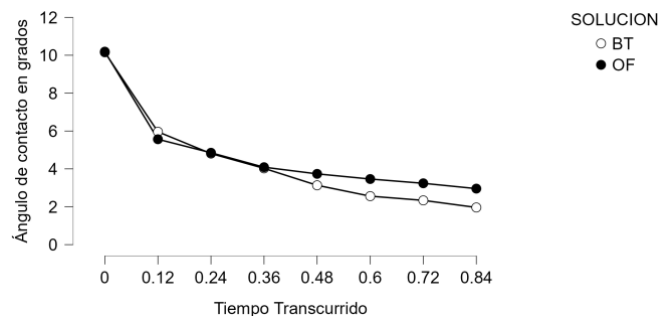


Fig.15. Ángulo dinámico lentes Air Optix (hidrogel de silicona) en presencia de las soluciones Biotrue (BT) y Opti-Free (OF)

En la figura 16 los datos promediados detallan la dinámica del ángulo de contacto para los lentes Air Optix en función de sus potencias esféricas (+2.75 D, +4.5 D, +4.75 D y -8 D). Al inicio del proceso (0 segundos), la lente de +2.75 D presentó el ángulo de contacto más elevado (11.5°), mientras que la lente de -8 D exhibió el valor inicial más bajo (7.5°), con las lentes de +4.5 D y +4.75 D en posiciones intermedias (9.5°). A lo largo de la medición, la lente de -8 D mantuvo consistentemente los ángulos de contacto más reducidos. Al finalizar los 0.84 segundos, la lente de -8 D alcanzó el ángulo más bajo (1.8°), seguida por la de +4.75 D (2.8°), la de +4.5 D (3.3°), y la de +2.75 D concluyó con el ángulo más alto (3.8°). Estos hallazgos indican que, para los lentes Air Optix, las potencias esféricas de magnitud más alta (especialmente -8 D y +4.75 D) promueven una superficie más hidrofílica, manifestada por ángulos de contacto iniciales y finales más bajos.

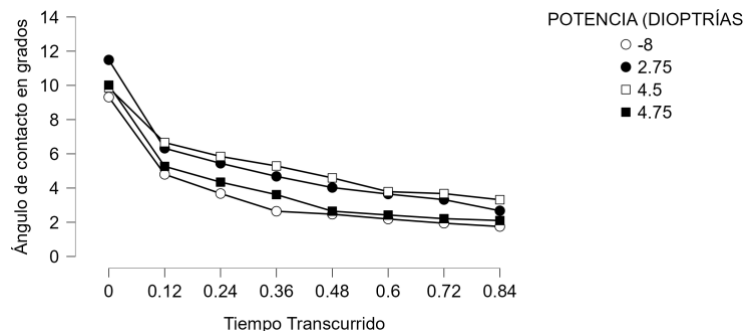


Fig.16. Dinámica del ángulo de contacto para los lentes AO en función de las potencias esféricas

La figura 17 presenta la evolución del ángulo de contacto dinámico para los lentes Soflens en relación con las soluciones Biotrue (BT) y Opti-Free (OF). Los lentes acondicionados con Biotrue mostraron un ángulo inicial superior (10.2°) en comparación con Opti-Free (8.5°) al tiempo 0 segundos. A pesar de una caída inicial pronunciada para Biotrue, la solución Opti-Free exhibió una reducción más sostenida del ángulo, resultando en un cruce de las curvas alrededor de los 0.60 segundos. Al término del período de 0.84 segundos, los lentes Soflens en Opti-Free lograron un ángulo de contacto notablemente inferior (0.8°) en contraste con Biotrue (2.0°). Estos resultados sugieren que, para el material de Soflens, la formulación de Opti-Free optimiza la humectabilidad superficial en las etapas finales del proceso dinámico.

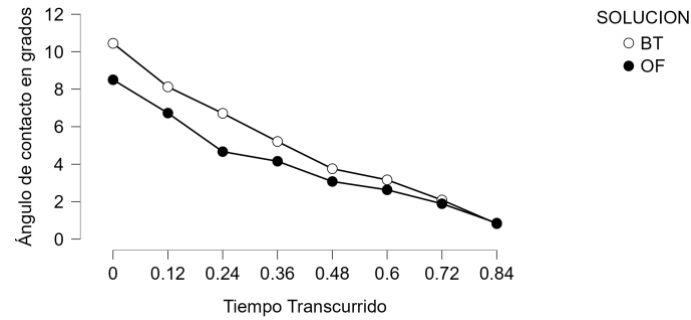


Fig.17. Ángulo dinámico lentes Soflens (Hidrogel) en relación con las soluciones Biotrue (BT) y Opti-Free (OF)

En la figura 18 los datos promediados ilustran la dinámica del ángulo de contacto para los lentes Soflens según sus potencias esféricas (+2.75 D, +4.5 D, +4.75 D y -8 D). La lente de +2.75 D presentó el ángulo de contacto inicial más alto (10.5°), seguida por la de +4.5 D (9.8°), con las lentes de +4.75 D y -8 D mostrando los valores iniciales más bajos (aproximadamente 7.5°). A lo largo de la medición, las potencias esféricas +4.75 D y -8 D mantuvieron ángulos generalmente bajos. Al finalizar los 0.84 segundos, la lente de +4.75 D exhibió el ángulo más bajo (0.5°), seguida de cerca por la de -8 D (0.8°). La lente de +2.75 D también alcanzó un ángulo final bajo (1.5°), mientras que la de +4.5 D concluyó con el ángulo más alto (2.5°). Estos hallazgos para Soflens indican que las potencias esféricas de magnitud más alta (especialmente +4.75 D y -8 D) se asocian con una humectabilidad superior, y que la lente de +2.75 D, a pesar de su inicio más hidrofóbico, demuestra una eficiente capacidad de rehumectación.

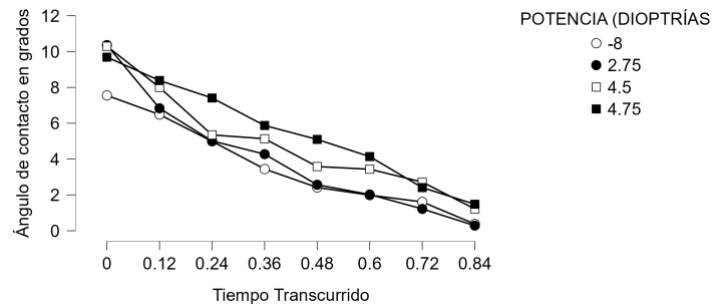


Fig.18. Ángulo dinámico lentes Soflens en función de las potencias esféricas

Es importante destacar que el método de la gota sésil empleado en esta investigación se aplicó sobre superficies de sólidos, específicamente lentes de contacto blandos, los cuales están compuestos por polímeros hidratados. Debido a esta característica, los tiempos de medición debían ser relativamente cortos, ya que la permeabilidad de las gotas en la interfaz del material podía generar variaciones en la medición del ángulo de contacto. Los resultados obtenidos demostraron que la técnica implementada es reproducible y generó datos mensurables confiables.

Cabe resaltar que, a pesar de las diferencias observadas en el comportamiento dinámico entre los materiales de los lentes y las soluciones de mantenimiento, todos los ángulos de contacto dinámicos registrados en este estudio se encuentran dentro de los rangos de humectabilidad adecuados y aceptados por la literatura científica para lentes de contacto blandos. Esto sugiere que tanto los materiales de los lentes como las soluciones de mantenimiento evaluadas cumplen con los requisitos fundamentales de humectación superficial esperados en el campo de la contactología.

Para asegurar la robustez de las mediciones, se calcularon los intervalos de confianza para los datos de ángulo de contacto, permitiendo establecer los rangos dentro de los cuales los resultados pueden ser considerados precisos. El error promedio de las mediciones, determinado a partir de la variabilidad en las repeticiones, se mantiene dentro de un margen aceptable, confirmando la fiabilidad de la metodología.

Adicionalmente, se destaca que las variaciones porcentuales no solo están asociadas a propiedades del material como el contenido de agua, sino que también reflejan la influencia de la geometría del lente (grado de curvatura) y las incertidumbres propias del proceso de medición. La precisión en la determinación de la curvatura y en los rangos de error angular es de suma importancia, y fue validada a través de un riguroso proceso de calibración, como se detalló en la sección 4.

7. Conclusiones

Este estudio ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

Se logró caracterizar la variación dinámica del ángulo de contacto en lentes de contacto blandos, utilizando las soluciones de mantenimiento Biotrue y Opti-Free, lo cual ofrece información valiosa sobre la humectabilidad superficial en condiciones dinámicas.

El diseño e implementación del sistema optoelectrónico propuesto demostró su efectividad para la medición precisa de los ángulos de contacto dinámicos en los lentes, validando la viabilidad de la configuración experimental desarrollada.

Se desarrolló exitosamente un código en MATLAB que permitió la reconstrucción precisa de la curvatura del lente de contacto y el seguimiento de las variaciones morfológicas de la gota de solución sobre su superficie, lo cual fue fundamental para el análisis dinámico.

Finalmente, se destaca que el tiempo de esparcimiento del líquido sobre la superficie del lente de contacto es una medición de interés fundamental para los diseñadores de productos, ya que influye directamente en la comodidad y la experiencia del usuario. Por lo tanto, se sugiere que futuras investigaciones se enfoquen en la medición del tiempo de esparcimiento total, complementando así la caracterización dinámica del ángulo de contacto presentada en este estudio.

Agradecimientos

El Autor y autoras expresan su gratitud a Mayelín Gómez, Decana de la Facultad de Optometría, a Fray Camilo Ernesto Ramírez Hermida O.P, Decano de División de Ciencias de la Salud, Diana Cristina Palencia Flórez, Líder del Grupo de Investigación GIESVI de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga. Por su colaboración para el desarrollo del proyecto de investigación “Estudio de la variación aproximada del ángulo de contacto dinámico en lentes de contacto blandos expuestos a soluciones de mantenimiento, implementando el método óptico de detección de bordes” aprobado en la XII convocatoria interna de proyectos de semilleros de investigación USTA.