

DESARROLLO DE PUPILÓMETRO PORTÁTIL PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA RESPUESTA PUPILAR

DEVELOPMENT OF PORTABLE PUPILLOMETER FOR THE CHARACTERIZATION OF PUPILLARY RESPONSE

Erick Flores Pérez

Universidad de Guanajuato, México
efloresperez@ugto.mx

Geovanni Hernández Gómez

Universidad de Guanajuato, México
geov.hernandez@ugto.mx

Misael López Ramírez

Universidad de Guanajuato, México
lopez.misael@ugto.mx

Recepción: 14/noviembre/2024

Aceptación: 16/abril/2025

Resumen

El análisis del comportamiento pupilar es una técnica no invasiva que se puede emplear para identificar diversos estados patológicos o psicológicos en una persona, ya que la pupila responde involuntariamente a estímulos lumínicos. Este trabajo presenta el desarrollo de un pupilómetro portátil de bajo costo, basado en una Raspberry Pi, para la medición del comportamiento pupilar ante estímulos luminosos monocromáticos. El dispositivo graba el cambio de diámetro pupilar en tiempo real mediante video, el cual es procesado posteriormente con software en MATLAB para generar la gráfica de la respuesta pupilar, que describe el comportamiento involuntario del ojo ante la luz. A diferencia de los pupilómetros comerciales, este prototipo busca ofrecer una alternativa accesible y económica. Los resultados muestran que el sistema tiene potencial para futuras aplicaciones en la evaluación de la salud ocular y otros estados clínicos. Se describen el hardware utilizado y los resultados preliminares de las pruebas realizadas, así como las expansiones contempladas para el proyecto.

Palabras Clave: Procesamiento de señales, Pupilómetro, Raspberry Pi, Respuesta pupilar, Visión por computadora.

Abstract

Pupillary behavior analysis a non-invasive technique that can be employed to identify certain pathological or psychological states in a person, as the pupil responds involuntarily to light stimuli. This work presents the development of a low-cost portable pupillometer, based on a Raspberry Pi, for measuring pupillary behavior in response to monochromatic light stimuli. The device records real-time changes in pupil diameter via video, which is subsequently processed using MATLAB software to generate a pupillary response graph that describes the involuntary behavior of the eye under light exposure. Unlike commercial pupillometers, this prototype aims to provide an accessible and economical alternative. The results demonstrate the potential of the system for future applications in ocular health assessment and other clinical conditions. The hardware used and preliminary results of the tests are described, as well as the expansions contemplated for the project.

Keywords: *Computer vision, Pupillometer, Pupillary response, Raspberry Pi, Signal processing.*

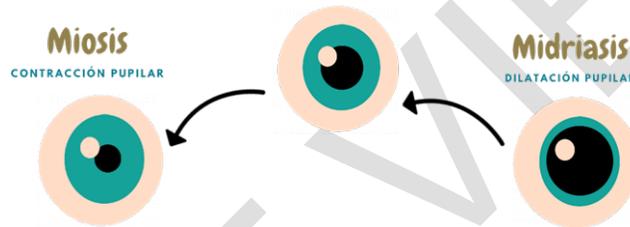
1. Introducción

La pupila es una estructura importante del cuerpo humano que puede proporcionar información valiosa sobre el bienestar físico y psicológico de una persona. Al tratarse de una ventana hacia el cerebro, controlada por el sistema nervioso autónomo, puede cambiar su tamaño en respuesta a estímulos internos o externos como la luz, las emociones o los medicamentos, proporcionando así una gran cantidad de información y características interesantes de una persona como su edad en función del diámetro pupilar, y datos relevantes relacionados con el campo médico [Jay, 2010], [Yamaji, 1997].

El comportamiento pupilar humano es un tema de investigación cada vez más importante debido a que se han demostrado las contribuciones prometedoras que tiene caracterizar la pupila tanto en el área de la biometría como en el entorno médico [Martins da Costa, 2012]. Por ejemplo, se ha hecho uso de este tipo de avances para mostrar la dinámica pupilar después de los efectos de la

administración de fentanilo, y se ha usado en la evaluación de pacientes con deterioro neurológico [Brown, 2015]. Además, se ha demostrado que el comportamiento pupilar puede servir como un complemento a manera de indicador para desórdenes o enfermedades como Alzheimer, Parkinson, autismo y hasta diabetes [El Haj, 2022], [Wang, 2016], [Nuske, 2014], [Hayashi, 2004].

El comportamiento pupilar (Figura 1), se basa en dos reflejos: contracción y dilatación, o miosis y midriasis, respectivamente. El tiempo que demora la pupila en pasar de midriasis a miosis, incluyendo el diámetro máximo y mínimo que se presenta durante el proceso, es el fenómeno que interesa analizar y que se utiliza para caracterizar la pupila.



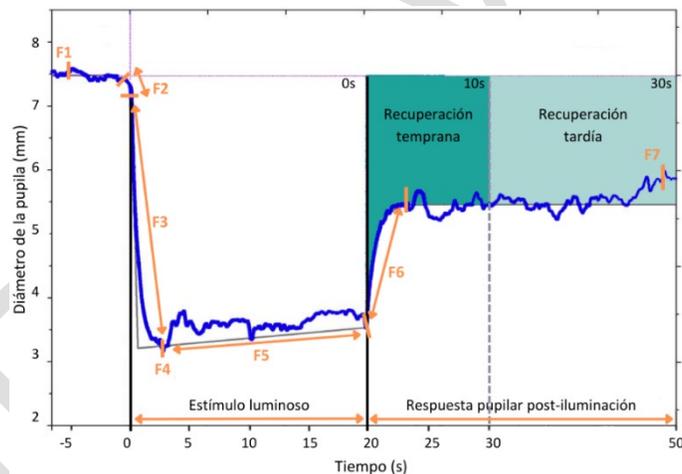
Fuente: elaboración propia

Figura 1 Comportamiento pupilar.

Tanto la miosis como la midriasis son reacciones involuntarias del ojo humano que se activan mediante un reflejo para controlar la cantidad de luz que ingresa en los ojos. La contracción se produce a medida que aumenta el nivel de incidencia de la luz, mientras que la dilatación se produce cuando el nivel de iluminancia disminuye [Gable, 2015], [Wang, 2015]. Actualmente no existe un estándar definido que regule los niveles máximos y mínimos de iluminación utilizados en los estudios, lo que puede influir en la consistencia de los resultados.

Mediante el análisis de la respuesta pupilar se puede obtener una gráfica de la caracterización del comportamiento pupilar denominada como respuesta pupilar. La respuesta pupilar se consigue al evaluar el diámetro de la pupila a lo largo del tiempo bajo estímulos luminosos. Esto se hace mediante un proceso denominado como pupilometría. La Figura 2 muestra las características que conforman la gráfica de la respuesta pupilar:

- F1. Dilatación inicial. Es el diámetro máximo registrado sobre el cual se inicia la prueba.
- F2. Latencia. Tiempo transcurrido entre el inicio del estímulo y el proceso de contracción. Usualmente es un cambio de diámetro cerca del 10%.
- F3. Tiempo hasta la contracción máxima. Tiempo transcurrido entre el inicio del estímulo y la máxima contracción registrada.
- F4. Contracción máxima. Pupila con el menor diámetro registrado.
- F5. Escape de pupila. Comportamiento de la pupila después de alcanzar la máxima contracción mientras el estímulo aún sigue activo.
- F6. Mayor velocidad de re-dilatación. Tiempo en el que se produce la dilatación a la mayor velocidad después del estímulo.
- F7. Dilatación final. Diámetro final registrado al momento de terminar la prueba [Silva, 2017].



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Características de la gráfica de la respuesta pupilar.

Conseguir una gráfica de la respuesta pupilar como la mostrada con anterioridad, requiere de diversos procesos que involucran desde un hardware físico que permita tomar grabaciones de la pupila incluso cuando hay poca o nula cantidad de luz, hasta un algoritmo de segmentación que permita detectar el diámetro de la pupila en cada instante de las grabaciones para convertir los datos en una señal representativa del comportamiento pupilar en función del tiempo.

Por otra parte, deben considerarse algunos aspectos igual de importantes, como establecer un protocolo de medición que indique el tiempo y procedimientos a seguir antes de hacer las grabaciones, ya que no se cuenta con alguno estandarizado, y prestar atención a los reflejos generados en la pupila para evitar detecciones erróneas durante el procesamiento de imágenes.

2. Métodos

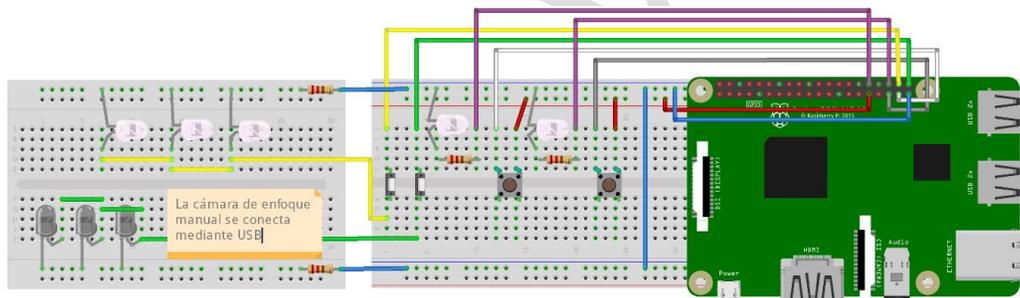
La gráfica de la respuesta pupilar se puede obtener mediante dos procesos principales: uno de ellos relacionado con la adquisición de imágenes de la pupila, mientras que el segundo centrado en procesamiento de dichas imágenes. Para hacer la adquisición de la pupila es necesario un hardware especializado que permita grabar y controlar LEDs infrarrojos y de luz blanca simultáneamente para hacer la función de control de iluminación durante las grabaciones. Es importante utilizar un microcontrolador que brinde la posibilidad tanto procesar video, como ajustar altos y bajos de voltaje en algunas terminales.

Se planteó utilizar como unidad de procesamiento principal para tomar las grabaciones una Raspberry Pi, ya que este dispositivo cuenta con diversas características de utilidad para el proyecto, como la capacidad de ejecutar código en Python y la compatibilidad con bibliotecas como OpenCV, que facilitan la adquisición de imágenes a través de una cámara WEB [Howse, 2013]. Una de las principales ventajas de optar por Python es que es un lenguaje de programación ampliamente estandarizado, de código abierto y con un extenso ecosistema de librerías que resultan de utilidad para el proyecto. Por ejemplo, es sencillo controlar los pines de salida y entrada de la Raspberry Pi mediante una librería, así como programar los tiempos de encendido o apagado, o incluso realizar comunicaciones con otros microcontroladores o periféricos, como pantallas y teclados, o facilitar la interconexión entre servidores, como VNC, para trabajar con la tarjeta de forma remota.

De esta manera, se diseñó el diagrama de conexiones de la Figura 3, el cual permite, mediante un código realizado en Python, tomar fotografías y videos en base a tiempos que se pueden especificar en el mismo código. Las conexiones del

diagrama son meramente ilustrativas para entender la manera en la que se conectó el sistema de iluminación, el cual consiste en tres LEDs convencionales de luz blanca conectados en paralelo, y tres LEDs infrarrojos de 850 *nm* conectados, de igual forma, en paralelo. Tanto los LEDs infrarrojos, como los LEDs de luz blanca, se conectan, a través de una resistencia de 100 *ohms*, a los puertos GPIO de la Raspberry Pi, los cuales subministran un voltaje de 3.3 *V*.

En el diagrama de conexiones de la Figura 3, se colocaron dos LEDs indicadores que permiten saber los instantes en los que el sistema está tomando una fotografía o video a través de alguno de los dos pulsadores. Además, se muestran las conexiones a los puertos GPIO de la Raspberry Pi de los mismos pulsadores, LEDs de iluminación, LEDs indicadores, resistencias, y switch de paso que se usaron solo para pruebas antes de automatizar el control de los LEDs de iluminación de luz blanca e infrarroja a través del código.



Fuente: elaboración propia

Figura 3 Diagrama de conexiones del sistema de iluminación y botones en la Raspberry.

Para tomar las grabaciones de la pupila, es necesario tener una base que permita colocar la cámara y los LEDs de una manera sencilla y cómoda para los voluntarios, sin dejar de lado la practicidad del experimento. Para ello, se diseñó, a partir de unos goggles convencionales, un armazón que permite ajustar todo el sistema en la cabeza de los voluntarios, obteniendo en el proceso una calidad de imagen excepcional tal y como se muestra más adelante.

El prototipo ensamblado en físico se muestra en la Figura 4. Adicional al diagrama de la Figura 3, se decidió colocar una pantalla táctil en la Raspberry Pi para facilitar la manipulación y configuración del sistema, a pesar de que se estuvo trabajando

remotamente durante el diseño del código. El armazón permite manipular la posición de la cámara, así como ajustar qué tan apretados o sueltos se colocan los goggles en los voluntarios. El enfoque de la cámara se puede ajustar girando el anillo de LEDs que se encuentra fijo en la cámara.

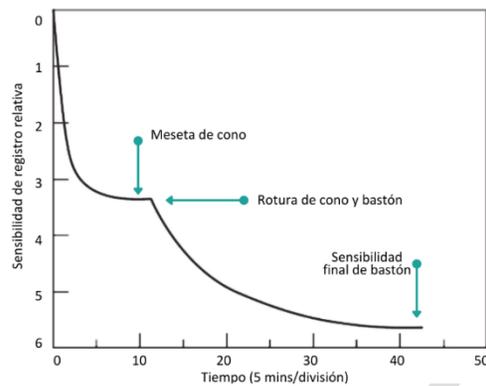


Figura 4 Prototipo final compuesto por la Raspberry Pi y el armazón de la cámara. Fuente: elaboración propia

Una vez que se tiene el prototipo físico, el siguiente paso es desarrollar el código para controlar las entradas y salidas de las terminales GPIO de la Raspberry Pi y manipular la cámara. Para ello, es importante considerar que, como se ha mencionado con anterioridad, no existe un protocolo estandarizado clínicamente aceptado que permita llevar un procedimiento controlado sobre los tiempos de oscuridad e iluminación a los que se debe exponer la pupila antes, durante y después de una prueba. Sin embargo, se han hecho diversos estudios importantes sobre el comportamiento de la pupila donde se indica el tiempo que demora el ojo en adaptarse a un ambiente de oscuridad.

La Figura 5 muestra uno de estos estudios presentado en el libro “Retinal Function and Genetic Disease” [Gabriel, 2012]. Este señala que los conos se adaptan más rápido a la oscuridad que los bastones. Los conos alcanzan su adaptación total aproximadamente a los 5 *min* y dominan la primera fase del gráfico. Los bastones se vuelven más sensibles aproximadamente hasta los 10 *min* de estar en la

oscuridad; a partir de entonces, predomina la sensibilidad de los bastones. A pesar de ello, la sensibilidad máxima final se alcanza hasta los 40 *min*.



Fuente: [Gabriel, 2012]

Figura 5 Curva de adaptación de la pupila humana a la oscuridad.

En base a lo mencionado con anterioridad y tomando en cuenta otros estudios experimentales de la literatura, se propone el protocolo de medición de la Figura 6 [Herbst, 2011], [Silva, 2017]. Con esta propuesta del protocolo, se asegura que se da el suficiente tiempo al ojo para alcanzar la sensibilidad adecuada de los conos y bastones sin requerir un tiempo excesivo por parte de los sujetos de prueba.



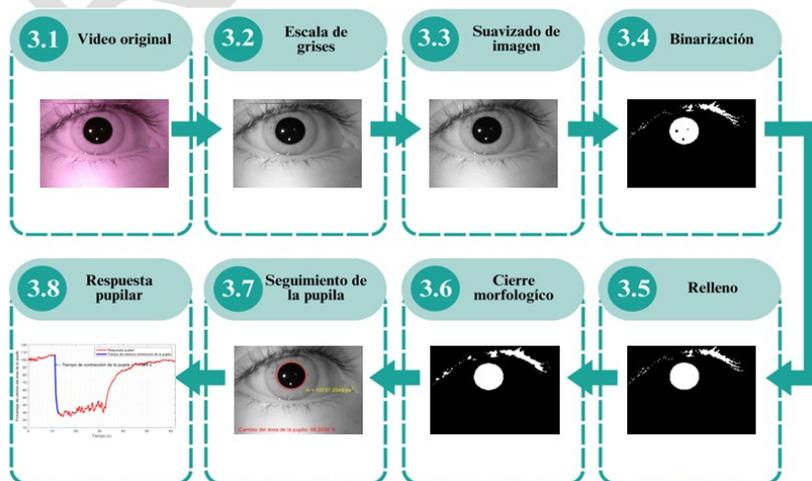
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Protocolo de medición para hacer la adquisición de videos de la pupila.

Una vez establecido el protocolo de medición, ya es posible desarrollar el código para automatizar las grabaciones de la pupila. En el código desarrollado, se establece un contador al presionar el botón de “grabar”, lo que permite saber cuándo finalizar cada video, respetando los tiempos del protocolo de medición. Al ejecutar el código, se muestra en la pantalla de la Raspberry Pi una previsualización de lo que la cámara ve, lo cual es de suma utilidad para ajustar adecuadamente la posición y parámetros de enfoque. Previo a que la grabación se inicie, ya se

encuentra activa la luz infrarroja para observar mediante la cámara el estado inicial de la pupila. Cuando comienza la grabación, se tienen inicialmente 10 s en los que se monitorea la pupila para, posteriormente, encenderse el estímulo lumínico durante 20 s. Una vez apagada la fuente de luz, se sigue grabando el comportamiento de la pupila durante otros 30 s para observar el periodo de recuperación. Cada una de las pruebas genera un archivo de video de 60 s en la memoria de la Raspberry Pi. Este archivo se puede extraer de manera sencilla para estudiarse en la fase del procesamiento de imágenes.

La etapa del procesamiento de imágenes es otro de los factores fundamentales mencionados con anterioridad. En esta etapa, los datos obtenidos durante las grabaciones de la pupila se transforman en la gráfica de la respuesta pupilar, siguiendo las características de la Figura 2. Al tratarse de un dispositivo preliminar, el algoritmo programado que se presenta en Figura 7 se encuentra actualmente desarrollado bajo la plataforma de MATLAB, debido a que facilita el manejo de datos matriciales, como las imágenes. Plataformas como MATLAB son de utilidad en la etapa experimental ya que permiten realizar pruebas rápidas, aplicar técnicas avanzadas de análisis de datos y modificar parámetros del procesamiento sin la necesidad de compilar el código. Esto agiliza el desarrollo y la validación de los algoritmos en las fases iniciales del proyecto, cuando se requieren ajustes frecuentes.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Algoritmo en MATLAB para la segmentación y detección de la pupila.

El algoritmo permite realizar el procesamiento de imágenes extraídas de los videos fotograma por fotograma para, después de una serie de filtros, obtener el radio y centro de la pupila. Con estos parámetros, es posible hacer la representación del comportamiento pupilar en base al porcentaje de cambio del área en la pupila. Como resultado de la segmentación, se tiene una señal que representa el área pupilar en función del tiempo. En este algoritmo es posible ajustar diversos parámetros que influyen en el resultado final, como el tamaño de ventana de algunos filtros, el umbral de binarización, el tamaño del disco para el cierre morfológico, o el rango de radios en pixeles para la detección de círculos.

3. Resultados

La experimentación se llevó a cabo con 10 *voluntarios* de diferentes edades, los cuales dieron su consentimiento informado para la realización y publicación de las pruebas. Las pruebas se realizaron en un cuarto oscuro de un laboratorio de la universidad, quien dio el visto bueno para llevar a cabo la experimentación. En todos los casos, solo la pupila del ojo derecho fue monitoreada y expuesta al estímulo de luz blanca. La Tabla 1 muestra los datos de los 10 *voluntarios* a quienes se les grabó su comportamiento pupilar. No se coloca su nombre por petición y respeto a la privacidad.

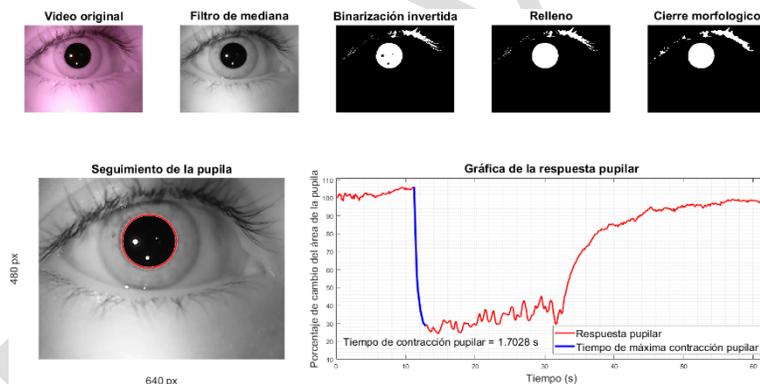
Tabla 1 Lista de voluntarios para la adquisición de la respuesta pupilar.

Nombre	Edad	Género	Color de pupila
<i>Sujeto 1</i>	19	F	Café
<i>Sujeto 2</i>	20	F	Café oscuro
<i>Sujeto 3</i>	19	F	Café
<i>Sujeto 4</i>	20	F	Café
<i>Sujeto 5</i>	19	F	Café
<i>Sujeto 6</i>	21	M	Café
<i>Sujeto 7</i>	19	M	Café oscuro
<i>Sujeto 8</i>	23	M	Café claro
<i>Sujeto 9</i>	24	M	Café
<i>Sujeto 10</i>	19	M	Café claro

Fuente: elaboración propia

Para las pruebas, se utilizó una computadora que cuenta con un procesador AMD Ryzen 5 5600H, una tarjeta gráfica NVIDIA RTX 3050, y 20 GB de RAM. El tiempo

de procesamiento para el ejemplo de la Figura 8 es de 287.4979 s. Esta cantidad de tiempo se debe a que se requiere un mayor nivel de procesamiento para mostrar en la ventana principal cada etapa de la segmentación. Si solo se requiere obtener la gráfica final, que es el análisis como tal de la respuesta pupilar, el tiempo de procesamiento es de 55.2754 s, para el caso de la Figura 8. Cada video fue grabado con una resolución de 640×480 *pixeles* a 10 fotogramas por segundo, con una duración de 60 s indicados en el protocolo de medición. El procedimiento fue capaz de extraer el comportamiento de la pupila utilizando su diámetro y calcular las características con éxito en todos los casos, a excepción del sujeto 10. Durante cada procesamiento, una pantalla como la de la Figura 8 muestra los resultados para las diferentes etapas de los filtros en cada fotograma. Al finalizar el procedimiento, se muestra un análisis rápido del tiempo que dura la pupila en contraerse una vez que el estímulo se enciende. Este análisis se resalta en color azul en el gráfico final.



Fuente: elaboración propia

Figura 8 Interfaz para el procesamiento de videos en MATLAB.

Es importante mencionar que, si la persona parpadea o mueve ligeramente su pupila durante la etapa de grabaciones, no hay ningún problema durante el procesamiento, pues el algoritmo guarda la última detección de círculos correcta hasta volver a detectar un nuevo diámetro válido. Sin embargo, si la persona mueve mucho su pupila o parpadea de manera constante, se genera un ruido considerable en la gráfica final de la respuesta pupilar, lo cual puede ser perjudicial para medir tiempos precisos en el comportamiento de la pupila. Por este motivo, es importante hacer grabaciones de la pupila lo más limpias posibles.

Las Tablas 2 y 3 muestran la gráfica de la respuesta pupilar para cada uno de los sujetos de prueba. Además, se indican algunos parámetros relevantes obtenidos durante el procedimiento, como el tiempo de contracción pupilar y los tiempos de procesamiento. En los casos donde el procedimiento no tuvo éxito, como en el sujeto 10, se debe a que la pupila se encontraba desde el comienzo parcial o totalmente cubierta por las pestañas o los parpados. Esto implica un problema en el algoritmo debido a que se utiliza el diámetro inicial del primer fotograma procesado como referencia para calcular el porcentaje en el cambio de área de la pupila en cada uno de los fotogramas posteriores. Al no haber una referencia inicial el programa marca error durante el procesamiento. Por otra parte, se llevó a cabo un análisis de costos con el fin de estimar el precio aproximado del prototipo experimental. Teniendo en cuenta los componentes utilizados, como la Raspberry Pi, la cámara, los LEDs y periféricos, se determinó que el precio del sistema, sin incluir el ordenador, se situaría en un rango estimado de 180 USD.

Tabla 2 Gráficas de la respuesta pupilar para sujetos 1, 2 y 3.

Nombre	Tiempo de procesamiento (s)	Tiempo de contracción pupilar (s)	Respuesta pupilar
			— Respuesta pupilar — Tiempo de máxima contracción pupilar
Sujeto 1	57.6564	1.9031	
Sujeto 2	60.1644	2.5039	
Sujeto 3	55.2754	1.7028	

Fuente: elaboración propia

Tabla 3 Gráficas de la respuesta pupilar para sujetos 4 al 10.

Nombre	Tiempo de procesamiento (s)	Tiempo de contracción pupilar (s)	Respuesta pupilar	
			— Respuesta pupilar	— Tiempo de máxima contracción pupilar
Sujeto 4	61.5029	0.8014	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 0.8014 s</p>	
Sujeto 5	56.6196	2.6043	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 2.6043 s</p>	
Sujeto 6	49.6923	1.5024	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 1.5024 s</p>	
Sujeto 7	53.6421	0.5008	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 0.5008 s</p>	
			<p>— Respuesta pupilar</p> <p>— Tiempo de máxima contracción pupilar</p>	
Sujeto 8	47.4735	1.5025	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 1.5025 s</p>	
Sujeto 9	39.7476	1.5025	<p>Gráfica de la respuesta pupilar</p> <p>Tiempo de contracción pupilar = 1.5025 s</p>	
Sujeto 10	--	--	--	

Fuente: elaboración propia

4. Discusión

El método automatizado actual para la pupilometría que se presentó en este estudio preliminar muestra un sistema de bajo costo capaz de caracterizar la pupila de un modo sencillo y automático. El prototipo ha demostrado ser eficiente en la captura y análisis de la respuesta pupilar ante estímulos lumínicos monocromáticos, utilizando herramientas accesibles como una Raspberry Pi y lenguajes de programación ampliamente difundidos como Python y MATLAB.

El enfoque permite realizar mediciones precisas del diámetro pupilar a lo largo del tiempo, proporcionando datos de calidad que, hasta ahora, solo eran obtenibles mediante equipos de alto costo en entornos clínicos o de investigación. Además, la posibilidad de ajustar parámetros clave en el procesamiento como los filtros y los umbrales de binarización, hace que el sistema sea flexible y adaptable a diferentes condiciones futuras que permitan ampliar el proyecto.

Si bien el prototipo presentado ha sido evaluado en un rango de edad joven (19-23 años), es importante considerar los desafíos que pueden surgir al usar este sistema con personas mayores. En esta población, son comunes los movimientos oculares involuntarios, como temblores, que pueden generar ruido en las grabaciones y dificultar el proceso de segmentación de la pupila, comprometiendo la precisión del algoritmo para detectar el borde pupilar de forma consistente. Una posible solución sería optimizar el algoritmo para hacerlo más robusto frente a estos movimientos, garantizando una detección fiable incluso ante inestabilidad ocular.

La fatiga física o la incomodidad al mantener una posición fija no se consideran un problema significativo, ya que el armazón que sostiene el sistema de captura está integrado en unos goggles que pueden ajustarse adecuadamente a cualquier usuario, permitiendo movimientos ligeros sin afectar la calidad de las grabaciones.

Por otra parte, vale la pena mencionar que el estudio del comportamiento pupilar humano ante estímulos de luz cromáticos es un área de interés que ha tomado mayor relevancia durante los últimos años debido al descubrimiento de un subgrupo de ganglios retinianos intrínsecamente fotosensibles, que han modificado conceptos previos sobre la base neural del reflejo pupilar [Güler, 2008]. La pupilometría cromática puede ser útil como método no invasivo para evaluar la función de los

conos y bastones, así como la integridad de las células ganglionares de la retina [Herbst, 2011].

Se tiene previsto profundizar en el estudio del comportamiento pupilar humano ante estímulos de luz cromáticos en futuras actualizaciones sobre este proyecto. El objetivo es investigar la relación entre diversas patologías y condiciones psicológicas y el reflejo pupilar ante estímulos de luz cromáticos. Asimismo, en próximas fases del proyecto, se planea migrar el código final de MATLAB a Python para mejorar más la parte de portabilidad del sistema, suprimiendo la necesidad de depender de una computadora para efectuar la etapa del procesamiento de imágenes, lo que mejoraría considerablemente la portabilidad, permitiendo aumentar la accesibilidad del sistema y mejorar su manipulación.

5. Conclusiones

Este estudio ha demostrado que los cálculos de la respuesta pupilar en varios momentos durante el registro fueron estables utilizando este prototipo de pupilómetro y algoritmos para el procesamiento de imágenes. La segmentación es un proceso esencial para este enfoque, ya que existe una gran variedad de procesos de filtrado que se pueden aplicar. Es importante considerar que cualquier mínima variación en los parámetros de los filtros puede provocar ligeros cambios en la detección de la pupila, lo que se traduce en variaciones considerables en el tiempo de contracción pupilar.

El parpadeo es uno de los principales problemas durante el proceso de segmentación de la pupila y es la principal causa de ruido en los datos de la gráfica de la respuesta pupilar. Mientras más fotogramas existan con una detección errónea del círculo de la pupila, más ruido habrá en la señal del resultado final en la respuesta pupilar. El algoritmo desarrollado es capaz de ajustar automáticamente el círculo de detección de la pupila cuando se detecta un diámetro no válido provocado por sombras o parpadeo en alguno de los fotogramas. Sin embargo, es importante considerar que siempre se requiere de un diámetro inicial válido para utilizarse como referencia durante toda la etapa del procesamiento; de lo contrario, no se puede procesar el video. Un ejemplo de lo anterior es el caso del sujeto 10 en

la Tabla 4. En ese caso particular, el voluntario parpadeó mucho durante toda la prueba, incluyendo el inicio de la grabación. Por lo tanto, no es posible obtener la gráfica de la respuesta pupilar con el algoritmo propuesto en ese archivo de video. Este artículo presenta un extracto de un estudio preliminar que actualmente se encuentra en fase de desarrollo. Si bien los resultados obtenidos hasta el momento proporcionan una base sólida para la caracterización de la respuesta pupilar, es importante señalar que el proyecto está en constante evolución. Los avances discutidos forman parte de una etapa exploratoria, cuyo objetivo es establecer las bases metodológicas y técnicas del sistema. A medida que el proyecto avance, se realizarán ajustes en los algoritmos de procesamiento, así como actualizaciones en el prototipo físico a fin de integrar las características expuestas en la sección de discusiones, y mejoras en la portabilidad por parte de la migración de código. Esto hará que los procedimientos sean aún más flexibles para aplicaciones más extensas.

Con el fin de validar los resultados obtenidos en las gráficas de la respuesta pupilar, se tiene la posibilidad de realizar una investigación en Arizona College of Optometry, en Estados Unidos. En dicha institución, se cuenta con el contacto de un especialista y compañero de trabajo con el que se proyecta colaborar para llevar a cabo la validación de resultados, aprovechando la disponibilidad de equipos especializados y metodologías propias de otros pupilómetros experimentales con los que disponen en la institución.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Brown, T. J., Connelly, M., Nichols, C., Neville, A. K. Developmental Changes of Normal Pupil Size and Reactivity in Children. *Journal of Pediatric Ophthalmology & Strabismus*, Vol. 52, No. 3, 147–151. May, 2015.
- [2] El Haj, M., Chapelet, G., Moustafa, A. A., Boutoleau-Bretonnière, C. Pupil size as an indicator of cognitive activity in mild Alzheimer's disease. *Journal of Experimental and Clinical Sciences*, Vol. 21, No. 1, 307–316. January, 2022.
- [3] Gable, M. T., Kun, L. A., Walker, N. B., Winton, J. R. Comparing Heart Rate and Pupil Size as Objective Measures of Workload in the Driving Context:

- Initial Look. Adjunct Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Vol. 1, No. 1, 20–25. September, 2015.
- [4] Gabriel, R. L. A., Peachey, S. N., Sunness, S. J. Retinal Function Testing and Genetic Disease. *Oxford Monographs on Medical Genetics*, No. 2, 343–346, 2012.
- [5] Güler, D. A., Ecker, L. J., Lall, S. G., Haq, S., Altimus, M. C., Liao, H., Barnard, R. A., Cahill, H., Badea, C. T., Zhao, H., Hankins, W. M., Berson, M. D., Lucas, J. R., Yau, K., Hattar, S. Melanopsin cells are the principal conduits for rod–cone input to non-image-forming vision. *Nature*, Vol. 453, No. 7191, 102–105. May, 2008.
- [6] Hayashi, K., Hyashi, H. Pupil Size Before and After Phacoemulsification in Nondiabetic and Diabetic Patients. *Journal of Cataract and Refractive Surgery*, Vol. 30, No. 12, 2543–2550. December, 2004.
- [7] Herbst, K., Sander, B., Milea, D., Lund-Andersen, H., Kawasaki, A. Test–Retest Repeatability of the Pupil Light Response to Blue and Red Light Stimuli in Normal Human Eyes Using a Novel Pupillometer. *Frontiers in Neurology*, Vol. 2, No. 1, 1–4. February, 2011.
- [8] Howse, J. *OpenCV Computer Vision with Python: Learn to Capture Videos, Manipulate Images, and Track Objects with Python Using the OpenCV Library*. 1st. Ed. Birmingham: Packt Publ, 41. April, 2013.
- [9] Jay, C. B., Karl, C. B., Aleem, I. M., Hari, B., Rockefeller, S. L. Y., Sandra M. B. The Effect of Gender and Iris Color on the Dark-Adapted Pupil Diameter. *Journal of Ocular Pharmacology and Therapeutics*, Vol. 26, No. 4, 335–340. August, 2010.
- [10] Martins da Costa, R., Gonzaga, A. Dynamic Features for Iris Recognition. *IEEE Transactions on Systems, Man, Cybern. B*, Vol. 42, No. 4, 1072–1082. August, 2012.
- [11] Nuske, J. H., Vivanti, G., Hundry, K., Dissanayake, C. Pupillometry Reveals Reduced Unconscious Emotional Reactivity in Autism. *Biological Psychology*, Vol. 101, No. 1, 24–35. September, 2014.

- [12] Silva, G. C. R., Gonçalves, C., Camilo, R. E. N., Boaretti dos Santos, F., Siqueira, J., Simões de Albuquerque, E., Alves de Melo Nunes Soares, F. A., Galdino de Oliveira, L. L., Martins da Costa, R. Automated Evaluation System for Human Pupillary Behavior. *International Medical Informatics Association (IMIA) and IOS Press*, Vol. 1, No. 1, 589–593. August, 2017.
- [13] Wang, C., McInnis, H., Brien, C. D., Pari, G. Disruption of Pupil Size Modulation Correlates with Voluntary Motor Preparation Deficits in Parkinson's Disease. *Neuropsychologia*, Vol. 80, No. 1, 176–184. January, 2016. DOI:10.1016/j.neuropsychologia.2015.11.019.
- [14] Wang, C., Munoz, P. D. A Circuit for Pupil Orienting Responses: Implications for Cognitive Modulation of Pupil Size. *Current Opinion in Neurobiology*, Vol. 33, No. 1, 134–140. August, 2015.
- [15] Yamaji K., Hiratai Y., Usui, S. The Pupil as a Possible Monitor of the Autonomic Nervous System. *Proceedings of the 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Vol. 1, No. 1, 2777–2781. November, 1997.