

Artículo de Investigación

PERFUSIÓN VASCULAR DE LA CABEZA DEL NERVIÓ ÓPTICO EN PACIENTES SANOS, HIPERTENSOS OCULARES Y CON GLAUCOMA TEMPRANO MEDIANTE ANGIO-OCT

Vascular Perfusion of the Optic Nerve Head in Healthy, Ocular Hypertensive, and Early Glaucoma Patients Using Angio-OCT

Alejandra C. Reverón¹  y María E. Reverón¹ 

¹Unidad Oftalmológica de Caracas, Caracas, edo. Miranda, Venezuela

Recibido: 30/01/2026

Aceptado: 30/03/2026

Autor de Correspondencia: Alejandra C. Reverón. Correo: areveronozal@gmail.com

Este artículo está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional (<https://creativecommons.org/>)



RESUMEN

El glaucoma es la principal causa de ceguera irreversible a nivel mundial. La teoría vascular sugiere que la reducción del flujo sanguíneo en la cabeza del nervio óptico (CNO) precede al daño estructural. **Objetivo:** Evaluar la perfusión vascular de la CNO en sujetos sanos, hipertensos oculares y pacientes con glaucoma temprano mediante Angio-OCT. **Métodos:** Estudio descriptivo y transversal que incluyó 60 ojos divididos en tres grupos (Sano, HTO, Glaucoma Leve). Se midió la densidad vascular (DV) y el índice de flujo (IF) utilizando el software Angioplex (Cirrus HD-OCT). **Resultados:** Se encontró una disminución estadísticamente significativa de la densidad vascular en el grupo con glaucoma temprano en comparación con los grupos sano e hipertenso ocular ($p < 0,001$). No hubo diferencias significativas entre sujetos sanos e hipertensos oculares. **Conclusiones:** La reducción de la perfusión capilar peripapilar es evidente en etapas tempranas del glaucoma, lo que respalda la utilidad del Angio-OCT como herramienta de diagnóstico precoz.

Palabras clave: Glaucoma; Angiografía por Tomografía de Coherencia Óptica; Densidad Vascular; Nervio Óptico

ABSTRACT

Glaucoma is the leading cause of irreversible blindness worldwide. The vascular theory suggests that reduced blood flow in the optic nerve head (ONH) precedes structural damage. **Objective:** To evaluate the vascular perfusion of the ONH in healthy subjects, ocular hypertensive patients, and patients with early glaucoma using Angio-OCT. **Methods:** A descriptive, cross-sectional study that included 60 eyes divided into three groups (Healthy, OHT, Early Glaucoma). Vessel density (VD) and flow index (FI) were measured using Angioplex software (Cirrus HD-OCT). **Results:** A statistically significant decrease in vessel density was found in the early glaucoma group compared to the healthy and ocular hypertensive groups ($p < 0.001$). No significant differences were found between healthy subjects and ocular hypertensives. **Conclusions:** The reduction in peripapillary capillary perfusion is evident in the early stages of glaucoma, supporting the utility of Angio-OCT as a tool for early diagnosis.

Keywords: Glaucoma; Optical Coherence Tomography Angiography; Vessel Density; Optic Nerve

INTRODUCCIÓN

El glaucoma representa un desafío crítico para la salud pública global, siendo la primera causa de ceguera irreversible a nivel mundial y la cuarta de pérdida visual general, superada solo por condiciones tratables como las cataratas y errores refractivos⁽¹⁾. Se estima que la prevalencia del glaucoma primario de ángulo abierto (GPAA) alcanza los 57.5 millones de personas, con proyecciones globales que superan los 60 millones de casos sospechosos⁽²⁾. Debido a su naturaleza asintomática, la mayoría de los diagnósticos ocurren en estadios moderados o avanzados, lo que subraya la necesidad urgente de biomarcadores para la detección en etapas tempranas.

Aunque su fisiopatología es multifactorial, la teoría vascular ha ganado un soporte sustancial en años recientes. Esta hipótesis postula que el glaucoma no es únicamente una neuropatía mecánica dependiente de la presión intraocular (PIO), sino que involucra una insuficiencia en la perfusión de la cabeza del nervio óptico (CNO). Factores como la reducción de la presión de perfusión ocular —definida por la diferencia entre la presión arterial media y la PIO— conducen a un daño isquémico, hipoxia y estrés oxidativo, desencadenando la apoptosis de las células ganglionares de la retina (CGR). La evidencia histopatológica, que incluye el adelgazamiento de paredes arteriales y oclusiones capilares, refuerza la relación entre el compromiso vascular y la neurodegeneración.

Históricamente, el diagnóstico se ha basado en la tríada de tonometría de Goldmann^(3,4), paquimetría corneal⁽⁵⁾ y campimetría computarizada (estándar de oro funcional, frecuentemente estadiado mediante el sistema *Hodapp-Parish-Anderson*)⁽⁶⁾. Sin embargo, el advenimiento de la Tomografía de Coherencia Óptica (OCT) revolucionó el análisis estructural al permitir la visualización de la capa de fibras nerviosas de la retina (CFNR) con resolución micrométrica. La evolución natural de esta tecnología hacia la Angiografía por OCT (OCTA) ha permitido, finalmente, la cuantificación no invasiva de la microvasculatura peripapilar mediante el análisis del movimiento de los eritrocitos, superando las limitaciones cualitativas e invasivas de la angiografía con fluoresceína^(7,8).

Desde las investigaciones pioneras de Jia *et al.* en 2012, quien desarrolló el algoritmo SSADA para detectar hipoperfusión en glaucomas pre-perimétricos⁽⁹⁾, la literatura ha validado consistentemente el uso de parámetros como el índice de flujo y la densidad vascular. Estudios fundamentales de Liu *et al.* (2015) y Yarmohammadi *et al.* (2016) demostraron que estos parámetros no solo son significativamente menores en ojos glaucomatosos, sino que correlacionan estrechamente con la desviación estándar del campo visual y el espesor de la CFNR (10,11). Evidencia reciente de Yospon y Rojananuangnit (2023) sostiene que la densidad de perfusión es altamente sensible para distinguir estadios de la enfermedad.

A pesar de esta sólida base, la relación causal definitiva y la variabilidad de la hipoperfusión entre diferentes fenotipos de glaucoma siguen siendo áreas de investigación activa. Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo determinar la utilidad diagnóstica de los parámetros de perfusión vascular de la CNO obtenidos mediante OCTA en una muestra de pacientes sanos, hipertensos oculares y con glaucoma temprano, buscando fortalecer la validación de la densidad vascular como un marcador clínico temprano.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se llevó a cabo un estudio observacional, descriptivo y transversal, con reclutamiento prospectivo, en pacientes evaluados en el Departamento de Glaucoma de la Fundación AVAO y la Unidad Oftalmológica de Caracas (Venezuela).

El protocolo de investigación se ciñó estrictamente a los principios bioéticos de la Declaración de Helsinki para la investigación en seres humanos, contando con la revisión y aprobación del Comité de Ética Institucional de la Unidad Oftalmológica de Caracas. Antes de su inclusión en la muestra, todos los participantes recibieron información detallada sobre la naturaleza de la investigación y los procedimientos a realizar; asimismo, se ratificó el carácter voluntario de su colaboración mediante la firma del consentimiento informado por escrito.

Población y Selección de la Muestra

La muestra se segmentó en tres grupos diagnósticos: Control (sanos), Hipertensión Ocular (HTO) y Glaucoma Leve. Los criterios de inclusión comunes para todos los grupos fueron: edad mayor de 18 años y agudeza visual mejor corregida (AVMC) de 20/40 o mejor.

- Grupo Control: Sujetos con presión intraocular (PIO) < 21 mmHg, disco óptico de aspecto normal, paquimetría en rangos de normalidad, y resultados de campo visual (CV) y tomografía de coherencia óptica (OCT) sin alteraciones.
- Grupo HTO: Pacientes con PIO > 21 mmHg, pero con disco óptico, paquimetría, CV y OCT dentro de límites normales.
- Grupo Glaucoma Leve: Pacientes con PIO > 21 mmHg, evidencia clínica de daño glaucomatoso en el disco óptico, hallazgos compatibles en OCT y daño funcional temprano en el CV según los criterios de Hodapp-Parrish-Anderson (H-P-A).

Se excluyeron pacientes con cirugías oculares previas (excepto catarata), patologías retinianas, retinopatía diabética o hipertensiva, neuropatías ópticas de otra etiología, procesos inflamatorios/infecciosos activos, antecedente de trauma ocular, y estudios de imagen (CV o OCT) no confiables o con artefactos.

Protocolo de Evaluación

Todos los participantes fueron sometidos a un examen oftalmológico integral que incluyó: medición de AVMC mediante foróptero y cartilla de Snellen; biomicroscopía en lámpara de hendidura; tonometría de aplanación de Goldmann con fluoresceína y filtro azul cobalto; y evaluación de fondo de ojo con lente de 60 o 90 D bajo filtro aneritra. La paquimetría corneal se realizó mediante ultrasonido, considerando el rango normal entre 520-550 μ .

La evaluación funcional se realizó mediante perimetría estática computarizada (Humphrey HFA, Carl Zeiss Meditec), estrategia SITA-Standard 24-2, estímulo III. Se consideraron confiables las pruebas con pérdidas de fijación < 20%, falsos positivos < 15%

y falsos negativos < 20%. El glaucoma leve se definió por los criterios H-P-A: desviación media (MD) entre 0 y -6 dB, menos de 13 puntos con $p < 5\%$ y ausencia de puntos ≤ 15 dB en los 5 grados centrales.

Adquisición de Imágenes (OCT y OCTA)

Se utilizó el equipo ZEISS HD-OCT Model Cirrus 5000 Angioplex™ (Carl Zeiss Meditec, Inc., Dublín, EE. UU.). Se obtuvieron tomas estructurales centradas en el nervio óptico y la mácula (análisis de células ganglionares), aceptando solo aquellas con intensidad de señal $\geq 6/10$.

Para la evaluación vascular, se empleó el protocolo de Angiografía por OCT (OCTA) con un patrón de exploración de 4.5 x 4.5 mm centrado en el disco óptico. Se cuantificaron dos parámetros principales:

1. Índice de flujo: Medida de la intensidad de la perfusión capilar.
2. Densidad de perfusión vascular: Área total de vasculatura perfundida por unidad de área.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El procesamiento y análisis estadístico de los datos se realizó mediante el lenguaje de programación Python (versión 3.x), utilizando las bibliotecas científicas Pandas para la gestión de datos y Statsmodels para el modelado avanzado.

Para la comparación de los parámetros vasculares (densidad vascular e índice de flujo) entre los grupos de estudio, se emplearon Modelos de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE). Esta técnica fue seleccionada para corregir la dependencia intrínseca de los datos (correlación entre ojos del mismo sujeto), tratando a cada ojo como una unidad de análisis independiente mediante una estructura de correlación intercambiable y una función de enlace de identidad.

Para el ajuste de las comparaciones múltiples entre los tres grupos, se aplicó el método de Holm-Bonferroni. Por otro lado, la homogeneidad de las variables demográficas continuas, como la edad, se validó mediante ANOVA de un factor. Los resultados se presentan como medias estimadas \pm error estándar (EE), estableciendo la significancia estadística en un valor de $p < 0.05$.

RESULTADOS

I. Características Demográficas y Distribución de la Muestra

Para este estudio se incluyeron 60 ojos de 38 pacientes, distribuidos en tres grupos de 20 ojos cada uno: Hipertensión Ocular, Glaucoma Leve y Control. Como se detalla en la Tabla 1, la muestra presentó una distribución simétrica en cuanto al número de ojos por grupo y lateralidad (Ojos Derechos vs. Izquierdos).

Respecto al sexo, la muestra general de 38 pacientes estuvo compuesta por un 60.5% (n=23) de mujeres y un 39,5% (n=15) de hombres, tal como se ilustra en el Gráfico 1. La distribución por grupos mostró porcentajes similares, con una ligera predominancia femenina en todos los casos.

Al analizar la distribución por edades, la media general de la muestra se situó en los $66,63 \pm 2,51$ años. Al desglosar este parámetro por grupos de estudio, se observó una distribución notablemente equilibrada. La comparación de las medias de edad entre los tres grupos (Control, HTO y Glaucoma Leve) mediante la prueba de ANOVA de una vía no reveló diferencias estadísticamente significativas, obteniendo un valor de $F = 0,086$ y una $p = 0,9171$, (Tabla 2).

2. Análisis de la Densidad Vascular (DV)

Al analizar la Densidad Vascular (%), el modelo GEE demostró una reducción significativa en el grupo de Glaucoma Leve en comparación con el grupo Control ($p = 1,5 \times 10^{-9}$) y el grupo de Hipertensión Ocular (HTO) ($p = 3,4 \times 10^{-9}$), Tabla 3. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los

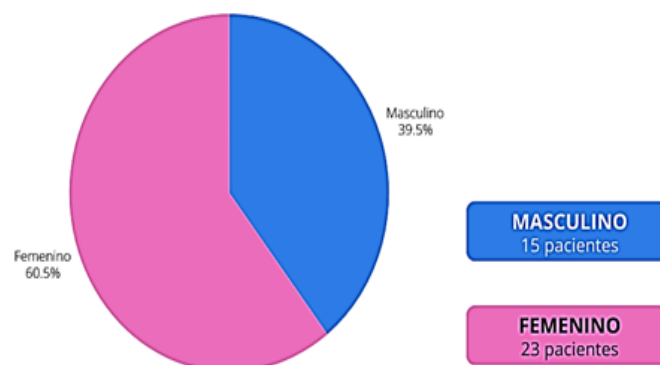


Gráfico 1.

Distribución por sexo de la muestra en general

ojos sanos y los hipertensos oculares ($p = 0,7752$). Esta disminución se visualiza claramente en el Gráfico 2.

Al comparar los parámetros de perfusión vascular entre los grupos mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE), se observó una reducción estadísticamente significativa en la densidad vascular (%) de los pacientes con glaucoma leve en comparación con el grupo control.

Como se detalla en la Tabla 4, la media estimada de densidad vascular en el grupo con glaucoma fue de $40,17 \pm 0,34\%$, mientras que en el grupo control se situó en $43,10 \pm 0,32\%$. Esta diferencia resultó ser altamente significativa con un valor de $p = 1,5 \times 10^{-9}$ (0,0000000015).

En el análisis comparativo entre los ojos con glaucoma leve y aquellos con hipertensión ocular (HTO), el modelo GEE reveló una diferencia estadísticamente significativa en la densidad vascular. Según se observa en la Tabla 5, el grupo de glaucoma leve presentó

Tabla 1. Distribución general de la muestra

Grupo de estudio	Ojos evaluados	Edad (Promedio \pm DS)	Sexo Masculino (%)	Sexo Femenino (%)	Ojos Derechos (%)	Ojos Izquierdos (%)
Hipertensión Ocular	20	$66,45 \pm 3,49$	35%	65,0%	50,0%	50%
Glaucoma Leve	20	$66,60 \pm 3,70$	40%	60,0%	55,0%	45%
Control	20	$66,10 \pm 4,44$	45%	55,0%	45,0%	55%

Tabla 2. Distribución por edad de la muestra			
Grupo de estudio	Ojos evaluados	Edad (Promedio \pm DS)	p (ANOVA)
Hipertensión Ocular	20	66,45 \pm 3,49	
Glaucoma Leve	20	66,60 \pm 3,70	0,9171
Control	20	66,10 \pm 4,44	

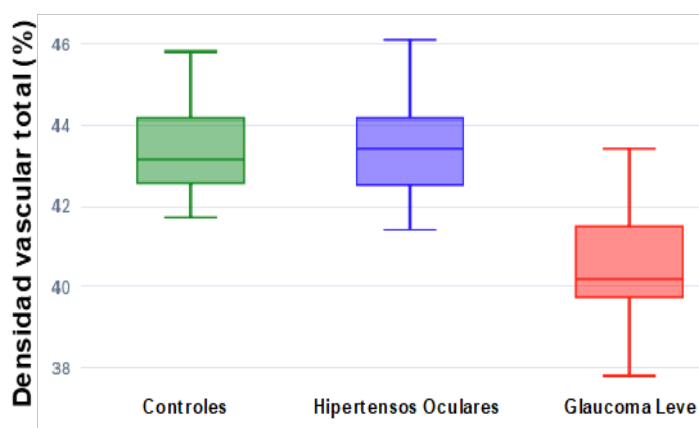


Gráfico 2.

Densidad vascular total por grupo de estudio

una densidad vascular media de $40,17 \pm 0,34\%$, valor significativamente inferior al $42,97 \pm 0,34\%$ registrado en el grupo HTO. Esta discrepancia alcanzó una significancia estadística de $p = 3,4 \times 10^{-9}$.

Finalmente, al comparar el grupo de hipertensión ocular (HTO) con el grupo control, el modelo GEE no mostró diferencias estadísticamente significativas en la densidad vascular peripapilar. Los datos presentados en la Tabla 6 indican que los ojos con HTO mantuvieron una densidad media de $42,97 \pm 0,34\%$, valor muy similar al $43,10 \pm 0,32\%$ observado en los sujetos sanos del grupo control.

El análisis estadístico arrojó un valor de $p = 0,7752$, confirmando la ausencia de una reducción vascular detectable en el grupo hipertenso.

3. Análisis del Índice de Flujo (IF)

El análisis del índice de flujo mediante el modelo GEE mostró un comportamiento clínico análogo al de la densidad vascular, confirmando una reducción severa de la perfusión en los ojos con neuropatía. Como se detalla en la Tabla 7, el grupo con glaucoma leve presentó un índice de flujo medio de $0,369 \pm 0,007$, lo que representa una disminución estadísticamente significativa al compararlo tanto con el grupo control ($0,432 \pm 0,006$; $p = 4,0 \times 10^{-11}$) como con el grupo HTO ($0,428 \pm 0,007$; $p = 1,0 \times 10^{-10}$).

Por el contrario, al comparar el índice de flujo entre los sujetos con hipertensión ocular (HTO) y el grupo control, no se evidenciaron diferencias significativas ($p = 0,6122$). Estos hallazgos se representan gráficamente en el Gráfico 3.

Al analizar específicamente el índice de flujo total entre los ojos con glaucoma leve y el grupo control, se identificó una reducción marcada y estadísticamente

Tabla 3. Comparación de la densidad vascular (%) de la cabeza del nervio óptico entre los grupos de estudio (Modelo GEE)				
Grupo de Estudio	N (ojos)	Media Estimada (%) (\pm EE)	Comparación	Valor p (adj. Holm)
Control	20	43,10 (\pm 0.32)	Control vs. HTO	0,7752
HTO	20	42,97 (\pm 0.34)	Control vs. Glaucoma	$1,5 \times 10^{-9}$
Glaucoma Leve	20	40,17 (\pm 0.34)	HTO vs. Glaucoma	$3,4 \times 10^{-9}$

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

Tabla 4. Comparación de datos de densidad vascular entre glaucoma leve y grupo control

	Glaucoma Leve (Media ± EE)	Control (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Densidad Vascular	40,17 ± 0,34	43,10 ± 0,32	1.5x10 ⁻⁹

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

Tabla 5. Comparación de la densidad vascular (%) entre Glaucoma Leve e Hipertensión Ocular (HTO)

	Glaucoma Leve (Media ± EE)	HTO (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Densidad Vascular	40,17 ± 0,34	42,97 ± 0,34	3.4x10 ⁻⁹

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

significativa en el grupo patológico. Como se detalla en la Tabla 8, el índice de flujo en el grupo con glaucoma leve fue de $0,369 \pm 0,007$, mientras que el grupo control mantuvo una media de $0,432 \pm 0,006$. Esta diferencia fue validada mediante el modelo GEE, obteniendo un valor de $p = 4,0 \times 10^{-11}$.

Al contrastar los ojos con glaucoma leve frente a los sujetos con hipertensión ocular (HTO), el análisis mediante el modelo GEE (Tabla 9) demostró una reducción significativa del flujo en el grupo glaucomatoso ($0,369 \pm 0,007$) respecto al grupo hipertenso ($0,428 \pm 0,007$), con un valor de $p = 1,0 \times 10^{-10}$.

Finalmente, la comparación del índice de flujo entre el grupo HTO ($0,428 \pm 0,007$) y el grupo control ($0,432 \pm 0,006$) no arrojó diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,6122$, Tabla 10). La preservación del flujo sanguíneo en los ojos con HTO sugiere que, en ausencia de daño estructural detectable, la autorregulación vascular peripapilar se mantiene similar a la de los sujetos sanos.

Tabla 6. Comparación de la densidad vascular (%) entre Hipertensión Ocular (HTO) y Grupo Control

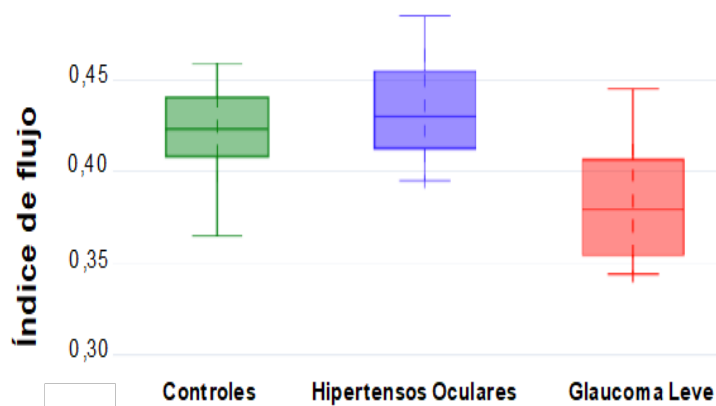
	HTO (Media ± EE)	Control (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Densidad Vascular	42,97 ± 0,34	43,10 ± 0,32	0,7752

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

Tabla 7. Índice de flujo por grupo de estudio

	Diferencia de Medias	Error Estándar	Valor p (Exacto)
Control vs. Glaucoma Leve	0,063	0,009	4,0x10 ⁻¹¹
HTO vs. Glaucoma Leve	0,059	0,009	1,0x10 ⁻¹⁰
Control vs. HTO	0,004	0,009	0,6122

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

**Gráfico 3.**

Índice de flujo por grupo de estudio

La Figura 1 presenta capturas representativas de cada grupo de estudio. Se observa una disminución progresiva en la densidad de perfusión y en el índice de flujo sanguíneo capilar, partiendo de los niveles óptimos en el sujeto control hacia una reducción evidente en el paciente con hipertensión ocular y, de forma más acentuada, en el caso de glaucoma leve.

Tabla 8. Comparación del índice de flujo total entre glaucoma leve y grupo control

	Glaucoma Leve (Media ± EE)	Control (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Índice de Flujo	0,369 ± 0,007	0,432 ± 0,006	4.0×10 ⁻¹¹

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

Tabla 9. Comparación del índice de flujo total entre glaucoma leve e hipertensión ocular

	Glaucoma Leve (Media ± EE)	HTO (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Índice de Flujo	0,369 ± 0,007	0,428 ± 0,007	1,0×10 ⁻¹⁰

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

Tabla 10. Comparación del índice de flujo total entre hipertensión ocular y grupo control

	HTO (Media ± EE)	Control (Media ± EE)	Valor p (GEE)
Índice de Flujo	0,428 ± 0,007	0,432 ± 0,006	0,6122

Nota: Medias estimadas y valores p calculados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) para corregir la correlación entre ojos del mismo sujeto. Ajuste de comparaciones múltiples mediante el método de Holm-Bonferroni

DISCUSIÓN

En el desarrollo de la investigación, se seleccionó un grupo aleatorio de pacientes, asegurando el cumplimiento de los criterios de inclusión y exclusión para permitir la evaluación de las características clínicas de manera objetiva. Al analizar la distribución por edades, se observó una edad media de 66 años en todos los grupos, lo que indica una baja variabilidad en esta covariable y minimiza el posible sesgo relacionado con la edad en los resultados. Respecto a las características demográficas, se observó un predominio del sexo femenino (60,5%), hallazgo que podría estar relacionado con patrones de consulta médica más frecuentes en mujeres.

Análisis de la Densidad Vascular (DV)

Tras el estudio de las características generales, se realizó el análisis de los parámetros objetivos, comenzando por la densidad vascular total (DVT). La diferencia entre los valores de DVT para los grupos control y glaucoma leve fue estadísticamente significativa, lo cual concuerda con lo reportado por Chen *et al.* en su estudio sobre perfusión de la cabeza del nervio óptico mediante microangiografía basada en tomografía de coherencia óptica⁽¹²⁾. De igual manera, Jia y sus colaboradores obtuvieron resultados estadísticamente significativos en su trabajo sobre angiografía OCT cuantitativa del flujo sanguíneo⁽⁹⁾. Asimismo, Yospon y cols., en octubre de 2023, publicaron resultados similares al presente estudio⁽⁸⁾.

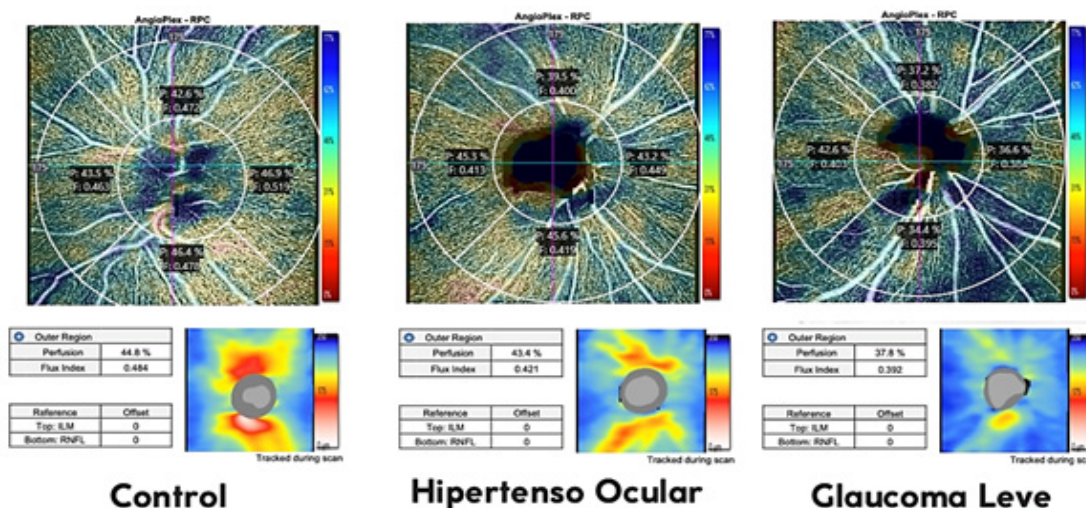


Figura 1. Comparativa de la microvasculatura peripapilar mediante OCTA en los grupos de estudio: Control, Hipertenso Ocular y Glaucoma Leve

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la densidad vascular total entre pacientes hipertensos oculares y controles. Estos resultados sugieren que la perfusión del nervio óptico no se ve comprometida de manera significativa en la hipertensión ocular aislada. Sin embargo, al comparar los grupos con hipertensión ocular y glaucoma leve, se obtuvo una $p < 0,01$, evidenciando que la perfusión total media es notablemente menor en el grupo de glaucoma leve, lo cual es comparable con los resultados mostrados por Yospon y Rojananuangnit en 2023⁽⁸⁾.

En términos generales, los resultados revelaron una disminución significativa de la densidad vascular en los pacientes con glaucoma en comparación con los controles sanos y los hipertensos oculares. Estos hallazgos cuantitativos respaldan la hipótesis de una hipoperfusión del nervio óptico en el desarrollo del glaucoma. Aunque los resultados son coherentes con estudios previos que demuestran una alteración en la microcirculación retiniana, aún no es posible determinar si la hipoperfusión es una causa o una consecuencia del daño glaucomatoso.

Análisis del Índice de Flujo (IF)

Posteriormente, se procedió al análisis del índice de flujo a nivel de la cabeza del nervio óptico. En los pacientes con glaucoma leve, el índice de flujo fue significativamente menor que en los pacientes control, similar a lo reportado por Chen y colaboradores en 2016 e igual a lo reportado por Yospon y Rojananuangnit en su publicación sobre diferencias en la densidad de perfusión vascular e índice de flujo del nervio óptico⁽⁸⁾. Jia y sus colaboradores⁽⁹⁾ también obtuvieron resultados comparables.

Al comparar estadísticamente los grupos de hipertensos oculares y controles, no se hallaron diferencias significativas, lo que sugiere que la hipertensión ocular, por sí sola, no parece estar asociada a la disminución del flujo a este nivel. Sin embargo, estos resultados discrepan con los obtenidos por Yospon *et al.*⁽⁸⁾, quienes reportaron una disminución del índice de flujo en pacientes hipertensos. Esta discrepancia podría atribuirse a diferencias en las características de las muestras o los criterios de inclusión; no obstante, es imperativo considerar el rol de los factores hemodinámicos sistémicos. Dado

que la presión de perfusión ocular (PPO) depende directamente de la presión arterial media, la ausencia de control sobre la presión arterial sistémica en los sujetos de estudio representa una variable interviniente que podría explicar tales diferencias. Aunque en la presente investigación los factores sistémicos no fueron el objeto de análisis primario, la estabilidad del flujo en nuestro grupo de hipertensos sugiere una autorregulación vascular preservada, a diferencia de lo reportado en otros contextos donde la PPO podría estar comprometida.

Conclusiones de la Comparativa

Finalmente, la comparación entre el grupo de hipertensos oculares y glaucoma leve arrojó diferencias estadísticamente significativas, lo que reafirma la existencia de una disminución del flujo vascular significativo en los pacientes con glaucoma. Estos resultados fueron comparables con los obtenidos por Jia, Chen y Yospon^(8,9,12)

Este análisis comparativo confirma la hipótesis de una disminución progresiva de la perfusión en el glaucoma, corroborando los resultados reportados por los autores mencionados^(8,9,12). Los hallazgos sugieren que la alteración del flujo sanguíneo podría ser un marcador temprano y un factor de riesgo para el desarrollo y progresión de la patología. No obstante, se destacan limitaciones como el tamaño de la muestra, por lo que investigaciones futuras con diseños longitudinales permitirán confirmar estos hallazgos y explorar la relación causal entre la hipoperfusión y el daño glaucomatoso.

CONCLUSIONES

Los hallazgos de esta investigación, analizados mediante el modelo de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE), revelan una asociación significativa entre la presencia de glaucoma leve y una disminución en la densidad vascular y el índice de flujo sanguíneo en la capa de fibras nerviosas peripapilares, en comparación con sujetos sanos e hipertensos oculares. Esta reducción cuantitativa refleja un compromiso en la perfusión microvascular de la región del disco óptico en los pacientes con glaucoma, lo cual constituye un

hallazgo característico de la enfermedad en estadios iniciales.

Dada la naturaleza transversal de este diseño, no es posible establecer una relación de causalidad o un valor diagnóstico precoz definitivo; sin embargo, la evidencia de una hipoperfusión en la región peripapilar tiene importantes implicaciones clínicas, sugiriendo que la evaluación de la microvasculatura podría ser una herramienta complementaria útil en el estudio de la patología. Es importante notar que, al no haberse controlado variables hemodinámicas sistémicas como la presión arterial y la presión de perfusión ocular (PPO), estos resultados deben interpretarse como una asociación estructural y funcional local.

En conclusión, se confirma una asociación entre la disminución de la perfusión capilar peripapilar y el daño glaucomatoso, lo cual sustenta la hipótesis vascular dentro del carácter multifactorial de la enfermedad.

En virtud de estos hallazgos, se recomienda realizar estudios longitudinales con una muestra de mayor tamaño para determinar si la disminución de la perfusión precede al daño estructural y evaluar su capacidad predictiva en la progresión. Asimismo, se sugiere que futuras investigaciones incluyan cohortes en estadios moderados y avanzados para cuantificar la correlación entre la perfusión y la severidad de la enfermedad, integrando el monitoreo de la presión arterial sistémica para un análisis integral de la hemodinámica ocular.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES:

Las autoras participaron de manera equitativa y sustancial en todas las etapas de la investigación. Esto incluye la concepción y diseño del estudio, el reclutamiento de pacientes y obtención de imágenes de Angio-OCT, el análisis estadístico avanzado mediante Modelos de Ecuaciones de Estimación Generalizadas (GEE) en Python, la interpretación de los resultados clínicos y la redacción, revisión y aprobación final del manuscrito.

Fuente de financiamiento:

La presente investigación no contó con fuentes de financiamiento externas ni subvenciones de organismos públicos o privados. Todos los recursos técnicos, equipos de diagnóstico (Angio-OCT Cirrus con Angioplex) e infraestructura fueron proporcionados por la Unidad

Oftalmológica de Caracas y la Fundación AVAO como parte de sus protocolos de investigación clínica institucional.

Conflicto de intereses: Las autoras declaran no tener ningún conflicto de intereses ni relación comercial con los productos o equipos mencionados en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Peng L. Vessel density and thickness of the retinal nerve fiber layer in early glaucoma. *Ann Clin Med Case Reports*. 2023;10(21):1–6.
2. Allison K, Patel D, Alabi O. Epidemiology of Glaucoma: The Past, Present, and Predictions for the Future. *Cureus*. 2020;12(11):e11686.
3. Blumberg MJ, Varikuti VNV, Weiner A. Real-world comparison between the Tonopen and Goldmann applanation tonometry in a university glaucoma clinic. *Int Ophthalmol*. 2021;41(5):1815–25.
4. Martínez de la Casa JM, García Feijoo J. Tonometría. En: *Manual de prevención del glaucoma*. Madrid: Ergon; 2011. p. 147-56.
5. Sng CCA, Ang M, Barton K. Central corneal thickness in glaucoma. *Curr Opin Ophthalmol*. 2017;28(2):120–6.
6. Susanna R Jr, Vessani RM. Staging glaucoma patient: why and how? *Open Ophthalmol J*. 2009;3(2):59–64.
7. Werner AC, Shen LQ. A Review of OCT Angiography in Glaucoma. *Semin Ophthalmol*. 2019;34(4):279–86.
8. Yospon T, Rojananuangnit K. Optical Coherence Tomography Angiography (OCTA) Differences in Vessel Perfusion Density and Flux Index of the Optic Nerve and Peri-Papillary Area in Healthy, Glaucoma Suspect and Glaucomatous Eyes. *Clin Ophthalmol*. 2023;17:3011–21.
9. Jia Y, Morrison JC, Tokayer J, Tan O, Lombardi L, Baumann B, et al. Quantitative OCT angiography of optic nerve head (ONH) circulation. *Biomed Opt Express*. 2012;3(12):3127–37.
10. Lombardi L, Davis E, Morrison JC. Optical coherence tomography angiography of the microvasculatura in glaucoma. *Ophthalmology*. 2016;123(9):1045–52.
11. Yarmohammadi A, Zangwill LM, Diniz-Filho A, Suh MH, Manalastas PI, Fatehee N, et al. Optical Coherence Tomography Angiography Vessel Density in Healthy, Glaucoma Suspect, and Glaucoma Eyes. *Investig Ophthalmol Vis Sci*. 2016;57(9):OCT451–9.
12. Chen CL, Bojikian KD, Gupta D, Wen JC, Zhang Q, Xin C, et al. Optic nerve head perfusion in normal eyes and eyes with glaucoma using optical coherence tomography-based microangiography. *Quant Imaging Med Surg*. 2016;6(2):125–33.