ISSN EN TRÁMITE

AI·E·P
Artificial Intelligence on Electronics and Photonics

**Recibido:** 1 de marzo de 2024
**Aceptado:** 20 de noviembre de 2024
**Publicado:** 5 de agosto de 2025

**Cómo citar:**
Betancourt-Guadarrama, E. F., Cruz-Barajas, J. E., Cruz-Cruz, L. A., Serrano-García, D. I. & Cervantes-L, J. "Módulo de adquisición de imágenes sensible a la luz naturalmente polarizada". *Artificial Intelligence on Electronics and Photonics* **1**(1) pp. 1-10. (2025).

# MÓDULO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SENSIBLE A LA LUZ NATURALMENTE POLARIZADA

## Image acquisition module sensitive to naturally polarized light

**Enrique Faqui Betancourt-Guadarrama[1], José Emmanuel Cruz-Bajaras[1], Luis Alfonso Cruz-Cruz[1], David Ignacio Serrano-García[1*], Joel Cervantes-L[1]**

[1] *Departamento de Electro-Fotónica, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías (CUCEI), Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco.*
* Autor de correspondencia: *david.serrano@academicos.udg.mx*

**PALABRAS CLAVE:**

Matriz de Mueller; vector de Stokes; polarización de la luz.

**KEYWORDS:**

Mueller matrix; Stokes vector; polarized Light.

## Resumen

En este trabajo se presenta un sistema óptico capaz de capturar imágenes de escenas remotas sensibles a la luz naturalmente polarizada. La polarización de la luz puede generarse naturalmente debido a fenómenos de reflexión y dispersión, lo cual es aprovechado en nuestro diseño. Se desarrolló un módulo de adquisición de imágenes capaz de detectar los parámetros de Grado de Polarización Lineal (DoLP) y Ángulo de Polarización Lineal (AoLP). El sistema incluye un polarizador lineal rotatorio, sincronizado con un sistema de captura de imágenes *Red*, *Green*, *Blue* (RGB, por sus siglas en inglés), montado en una estructura mecánica diseñada con técnicas de impresión 3D. La sincronización y adquisición de datos se llevaron a cabo mediante un módulo de Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) basado en Arduino, controlado por Matlab. Los resultados experimentales demuestran la efectividad del sistema para analizar escenas con variaciones de luz polarizada, evidenciando su potencial para aplicaciones en teledetección y análisis remoto.

## Abstract

In this paper we present an optical system capable of capturing images of remote scenes sensitive to naturally polarized light. Light polarization can be generated naturally due to reflection and scattering phenomena, which is exploited in our design. An image acquisition module capable of detecting the parameters of Degree of Linear Polarization (DoLP) and Angle of Linear Polarization (AoLP) was developed. The system includes a rotating linear polarizer, synchronized with a Red, Green, Blue (RGB) imaging system. RGB imaging system, mounted on a mechanical structure designed using 3D printing techniques. Synchronization and data acquisition were carried out using an Arduino-based IoT module controlled by Matlab. Experimental results demonstrate the effectiveness of the system for analyzing scenes with polarized light variations, showing its potential for remote sensing and remote analysis applications.

## 1. Introducción

La polarimetría de imágenes ha emergido en las últimas décadas como una herramienta poderosa para aumentar la información disponible en una variedad de aplicaciones, como la teledetección para mediciones de parámetros físicos relacionados con cambios atmosféricos [1]. Por ejemplo, en la banda de radiofrecuencia, diversos autores han implementado modelos utilizando el factor teórico de reflectividad de las nubes para la caracterización del granizo [2]. Además, considerando la forma, distribución del tamaño, temperatura y trayectoria de las gotas, otros investigadores desarrollaron un modelo geométrico basado en la dispersión de la luz [3].

En el espectro visible, se han llevado a cabo estudios sobre fenómenos naturales como eclipses solares y el comportamiento de la atmósfera y las nubes. Por ejemplo, en el verano de 2008, se desplegó un polarímetro de imágenes en el Observatorio Mauna Loa, en Hawái, para estudiar la polarización atmosférica en cielos despejados [4]. Las nubes cubren aproximadamente el 60% de la superficie terrestre y tienen una gran influencia en el clima. En [5], se demostró teóricamente que el signo del parámetro $S_1$ de Stokes es sensible a la fase termodinámica de la nube cuando se observa con un polarímetro pasivo terrestre. En 2017, Joseph A. Shaw *et al.* [6,7] desarrollaron un polarímetro pasivo con visión periférica capaz de detectar la fase termodinámica de las nubes. Recientemente, la detección se ha trasladado del rango de microondas al espectro visible, y solo unos pocos autores han explorado este tema [8-11], lo cual constituye la principal motivación de este proyecto.

En este estudio, se presenta un dispositivo óptico capaz de capturar imágenes remotas de fenómenos físicos que involucran luz naturalmente polarizada. La sección dos presenta el marco teórico de esta investigación; las secciones tres y cuatro describen el esquema de detección, así como el dispositivo y los resultados experimentales; en la sección cinco se hace el análisis y discusión; y finalmente, en la sección seis se presentan las conclusiones.

## 2. Marco Teórico

Utilizando la aproximación de Stokes y Mueller, la detección de la luz naturalmente polarizada se obtiene como

$$S_{out} = LP(\theta)\, S_{in} \tag{1}$$

donde $S_{in} = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ representa el estado de polarización de la luz naturalmente polarizada y $^T$ significa la operación matricial traspuesta y $S_{out} = [S_{out\,0},$

$S_{out\,1}$,$S_{out\,2}$,$S_{out\,3}$]$^T$ el estado de polarización obtenida por la rotación del polarizador lineal $LP\,(\theta)$, a un ángulo $\theta$ dado por [12,13]

$$LP\,(\theta) = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & cos2\theta & sin2\theta & 0 \\ cos2\theta & cos^2 2\theta & sin2\theta cos2\theta & 0 \\ sin2\theta & sin2\theta cos2\theta & sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \tag{2}$$

Al efectuar la multiplicación matricial, La intensidad detectada, Idet se obtiene mediante el primer elemento del vector de Stokes de salida, $S_{out\,0}$, como:

$$I_{det} = S_{out0} = S_0 + S_1 cos2\theta + S_2 sin2\theta. \tag{3}$$

En este caso, $S_0$ representa la intensidad total, $S_1$ y $S_2$ los parámetros de polarización lineal horizontal/vertical y ± 45 grados respectivamente. Es importante notar que, debido a que solo usamos un polarizador lineal, el análisis se centra en los componentes lineales del vector de Stokes. Utilizando los parámetros de la ecuación (3), se puede obtener el grado de polarización lineal, *Degree of Linear Polarization* (DoLP) y su orientación, *Angle of Linear Polarization* (AoLP), representados como:

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \tag{4}$$

$$AoLP = tan^{-1}\left(\frac{S_2}{S_1}\right). \tag{5}$$

En este caso, estos parámetros se utilizan para caracterizar la luz naturalmente polarizada en términos de la variación espacial del grado de polarización lineal y su orientación.

## 3. Esquema de Detección de la Luz Naturalmente Polarizada

El sistema de captura y análisis de polarización propuesto está diseñado para observar escenas bajo iluminación ambiente, considerada no polarizada. La iluminación proporcionada por fuentes naturales, como la luz solar difusa, permite evaluar cómo las propiedades de los objetos influyen en el estado de polarización de la luz reflejada. El objetivo principal es analizar las características de polarización de la luz reflejada en la escena bajo estudio, utilizando parámetros de polarización lineal como AoLP y DoLP. La escena bajo estudio puede

incluir diversos materiales y superficies, cuyas propiedades ópticas afectan la polarización de la luz reflejada, como se muestra en la Figure 1. En esta configuración, la escena es iluminada por luz ambiente (no polarizada) y el módulo de detección capta la luz naturalmente polarizada por reflexión. El módulo de detección está compuesto por un polarizador lineal rotatorio, una cámara RGB y un Arduino para la sincronización, conectado a una PC para el procesamiento de imágenes.

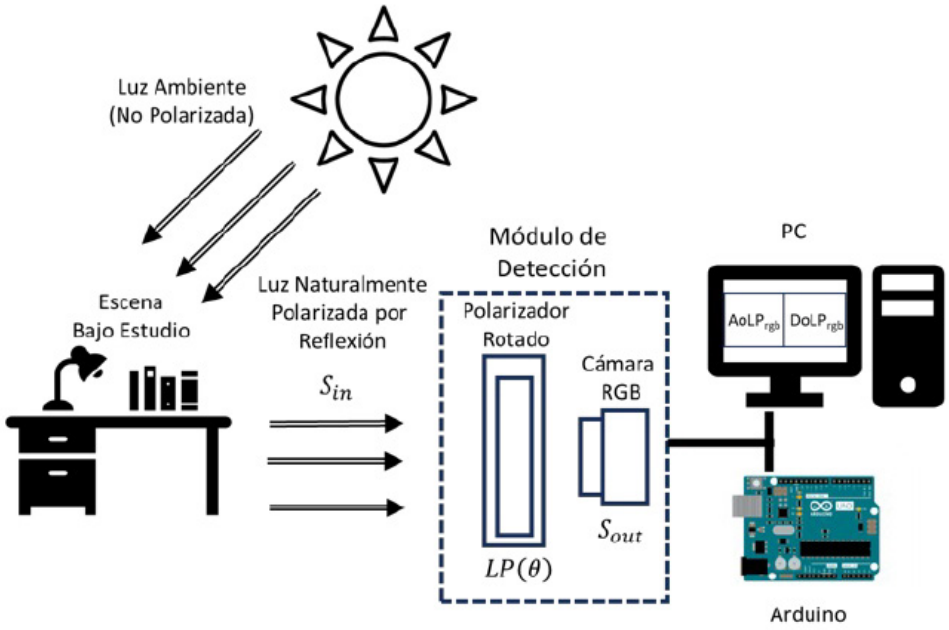


**Figure 1.**

Diagrama del sistema experimental para el análisis de luz naturalmente polarizada. La escena bajo estudio es iluminada por luz ambiente no polarizada y observada por un módulo de detección que incluye un polarizador lineal rotatorio, controlado mediante un Arduino. Las imágenes capturadas en distintas orientaciones del polarizador permiten calcular el AoLP y el DoLP, proporcionando información sobre la dirección y grado de polarización de la luz reflejada en la escena.

El polarizador lineal está montado sobre un mecanismo controlado electrónicamente y sincronizado mediante una placa Arduino. La rotación del polarizador permite adquirir imágenes de la escena bajo diferentes orientaciones del filtro polarizador, capturando así múltiples componentes de la polarización de la luz reflejada. Durante el proceso de adquisición, se captura una serie de imágenes a medida que el polarizador rota en pasos angulares definidos. Este enfoque permite obtener un conjunto de datos de intensidad correspondientes a diferentes ángulos de polarización para después ser procesados.

## 4. Dispositivo implementado y resultados experimentales

Se diseñó el módulo de detección con el objetivo de ser escalable, económico e interconectado, sin comprometer la respuesta espacial y de polarización en la detección. El sistema fue modelado con el *software* Autodesk Fusion 360, considerando las dimensiones reales de los componentes, como la cámara web y el motor a pasos (Figura 2). En las Figuras 2 (*a*) y (*b*) se muestra el diseño ensamblado y las partes internas, respectivamente, utilizando el *software* de diseño. La Figura 2 (*c*) ilustra la implementación física del sistema mediante impresión 3D. El módulo de rotación se basa en un engranaje de gusano (*worm gear*) con una relación de transmisión de 1:10. Esta relación fue seleccionada para permitir que el polarizador lineal complete una vuelta completa (360°) con 36 rotaciones del motor principal. El diseño mecánico implementado utiliza un motor a pasos 28BYJ-48 y una cámara web Logitech C920, garantizando una rotación precisa y capturas de alta calidad para el análisis polarimétrico.

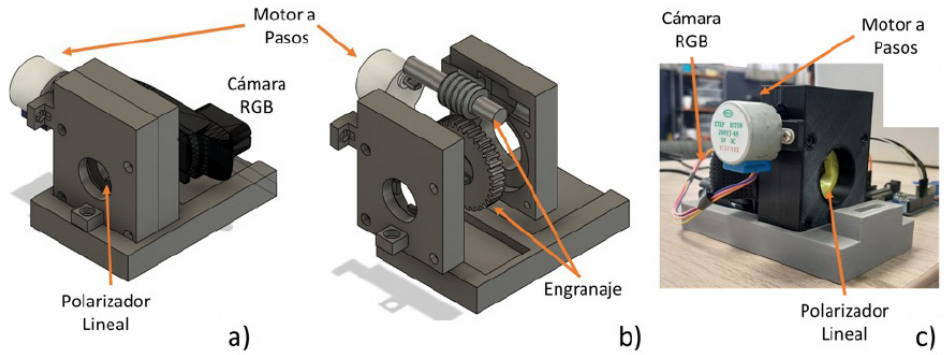


**Figure 2.**

*a*) Diseño ensamblado del módulo de detección en el software Fusion 360, mostrando la cámara y el motor a pasos. *b*) Vista interna del diseño con el mecanismo de rotación basado en un engranaje de gusano con una relación de transmisión de 1:10. *c*) Implementación física del módulo utilizando impresión 3D, integrando el motor a pasos 28BYJ-48 y la cámara web Logitech C920.

La Figura 3 muestra el procesamiento de datos para el canal rojo de una escena. En la Figura 3 (*a*) se presenta la primera imagen a color obtenida con el polarizador orientado a 0 grados, mientras que en la Figura 3 (*c*) muestra la imagen correspondiente al canal rojo. La Figura 3 (*b*) ilustra la variación de intensidad del canal rojo en un punto central, marcado con una cruz en (*c*), a

medida que se rota el polarizador lineal. Los coeficientes de Fourier obtenidos a partir de esta señal se muestran en Figura 3 (*d*) y fueron utilizados para calcular los parámetros de Stokes de la luz naturalmente polarizada. En este análisis, se emplearon los coeficientes $a_0$, $a_2$ y $b_2$, correspondientes a $S_0$, $S_1$ y $S_2$ respectivamente. Utilizando estos coeficientes y la ecuación (3), se obtuvo una estimación teórica de la intensidad, con un error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de 17.8, una diferencia máxima de 37.6, y una diferencia mínima de 1.30.

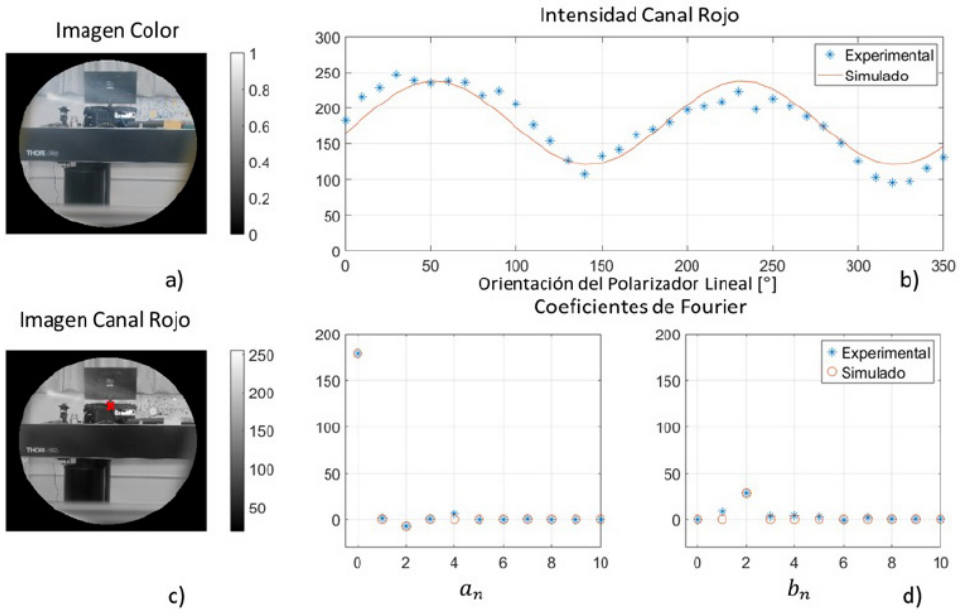


**Figure 3.**

Procesamiento de datos para el canal rojo de una escena. *a*) Imagen a color con el polarizador orientado a 0°. *b*) Variación de la intensidad en el canal rojo en un punto central marcado. *c*) Imagen del canal rojo. *d*) Coeficientes de Fourier obtenidos para el cálculo de los parámetros de Stokes, utilizando $a_0$, $a_2$ y $b_2$ correspondientes a $S_0$, $S_1$ y $S_2$.

En la Figura 4 se muestran los mapas espaciales de los componentes del vector de Stokes ($S_0$, $S_1$ y $S_2$) para cada canal de color (rojo, verde y azul) de la captura RGB. La primera fila presenta los mapas de $S_0$, que representan la intensidad total capturada para cada canal, proporcionando información sobre la luz reflejada en la escena. La segunda fila muestra las variaciones espaciales del componente de polarización lineal horizontal/vertical ($S_1$), normalizada respecto a $S_0$ ($S_1/S_0$), lo que permite identificar las áreas de la escena con mayor contraste de polarización debido a la reflexión. La tercera fila muestra las variaciones de la componente de polarización lineal en ± 45 grados ($S_2$), también

normalizada respecto a $S_0$ ($S_2/S_0$). La normalización de $S_1$ y $S_2$ respecto a $S_0$ facilita la visualización de las regiones de la escena que presentan cambios significativos en la polarización lineal, destacando las áreas donde la reflexión de la luz ambiente influye en la polarización.

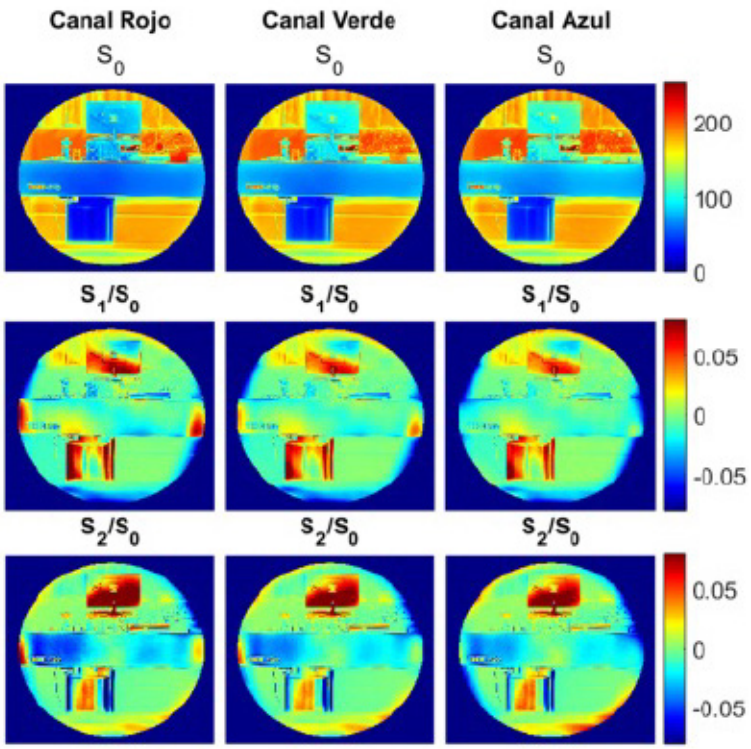


**Figure 4.**

Mapas espaciales de las componentes del vector de Stokes para los canales RGB. La primera fila muestra la intensidad total ($S_0$), mientras que la segunda y tercera filas presentan las componentes de polarización lineal normalizadas ($S_1/S_0$ y $S_2/S_0$), respectivamente. La normalización facilita la visualización de las variaciones de polarización debidas a la reflexión de la luz ambiente en la escena.

Debido a la obtención de las componentes lineales del vector de Stokes, la Figura 5 presenta los mapas de DoLP y AoLP para los canales RGB, calculados a partir de las componentes del vector de Stokes. Los mapas de DoLP muestran la intensidad de la polarización lineal, mientras que los mapas de AoLP revelan la orientación del vector de polarización en cada canal de color.

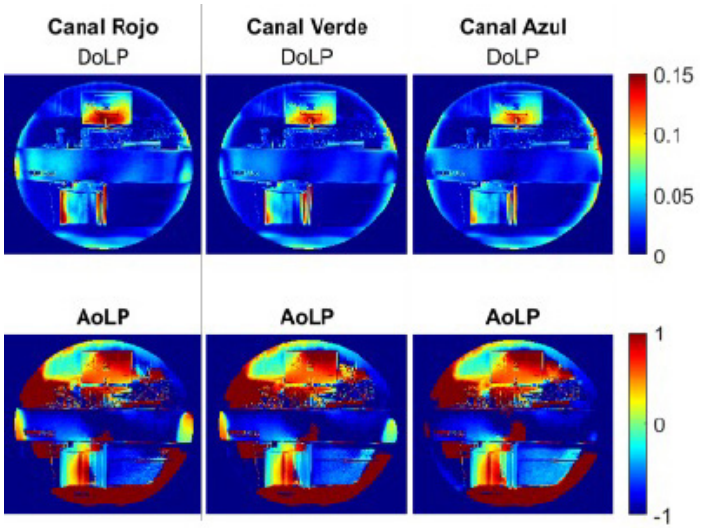


**Figure 5.**

Mapas de DoLP y AoLP para los canales rojo, verde y azul. La fila superior muestra el DoLP para cada canal RGB, y la fila inferior presenta el AoLP. Estos mapas permiten analizar la intensidad y orientación de la polarización lineal en la escena bajo estudio.

En la Figura 6 se muestra una fusión en pseudocolor del AoLP, destacando tres regiones específicas: 1) los monitores, 2) los laterales de la mesa óptica y 3) los soportes de la mesa óptica. Estas áreas presentan diferencias significativas en comparación con el fondo, lo que permite identificar variaciones en la respuesta de la luz naturalmente polarizada debido a la reflexión en diferentes materiales y geometrías de la escena.

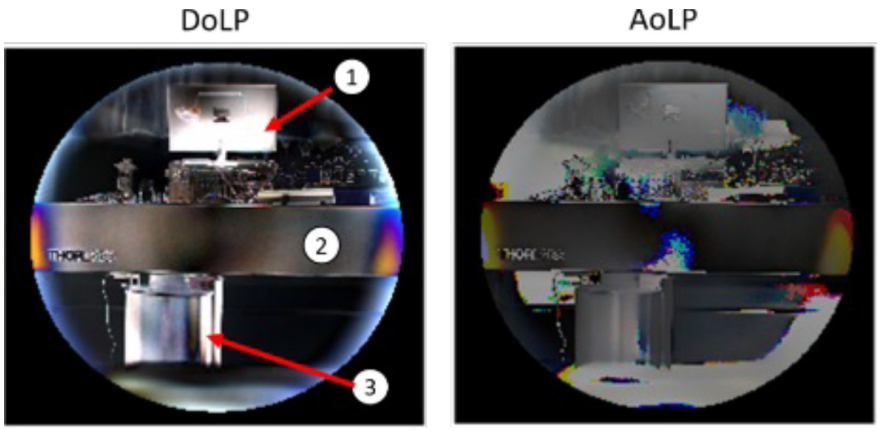


**Figure 6.**

Fusión en pseudocolor del AoLP, destacando tres regiones de interés: los monitores, los laterales de la mesa óptica y los soportes de la mesa óptica. Estas áreas muestran una respuesta distintiva a la luz naturalmente polarizada, diferenciándose claramente del fondo.

## 5. Análisis y Discusión

Los resultados obtenidos a partir de los mapas de $S_1$, $S_2$ y DoLP permiten identificar diferencias significativas en las propiedades de polarización de las tres regiones seleccionadas: los monitores (región 1), los laterales de la mesa óptica (región 2) y los soportes de la mesa óptica (región 3). Estas diferencias son indicativas de cómo la geometría y los materiales de la escena influyen en el comportamiento de la luz polarizada, proporcionando información adicional sobre las interacciones ópticas que no serían evidentes solo a partir de la intensidad.

En el parámetro $S_1$, se destaca un fuerte contraste entre las regiones 1 y 3 respecto a la región 2, lo que sugiere una polarización más intensa en las superficies planas y reflectantes, como el monitor y los soportes de la mesa óptica. Este comportamiento es coherente con el aumento de la polarización lineal debido a la reflexión especular en estas superficies. Por otro lado, los mapas de $S_2$ revelan una señal opuesta entre las regiones 1 y 3, lo que indica una variación en la orientación de la polarización lineal. Esta diferencia se debe a la interacción de la luz con la geometría plana del monitor y los soportes, en contraste con la forma cilíndrica de los laterales de la mesa óptica.

En los mapas de DoLP, se observa claramente cómo los laterales de la mesa óptica (región 2) destacan debido a su forma cilíndrica. Esta geometría curva influye en la forma en que la luz se polariza al reflejarse, generando una variación en la magnitud del DoLP en comparación con las superficies planas del monitor (región 1) y los soportes (región 3). Estos resultados evidencian cómo la forma geométrica y las propiedades del material afectan la polarización de la luz reflejada, proporcionando una herramienta valiosa para el análisis de escenas complejas.

Finalmente, el uso combinado de $S_1$, $S_2$ y DoLP permite una caracterización detallada de las propiedades ópticas de la escena, destacando variaciones en la polarización de la luz que pueden estar asociadas a la forma y composición de los objetos. Este análisis polarimétrico ofrece una visión más profunda del comportamiento de la luz naturalmente polarizada y abre nuevas posibilidades para aplicaciones en teledetección y análisis de materiales.

## 6. Conclusión

El sistema propuesto de captura de imágenes ha demostrado ser capaz de detectar luz naturalmente polarizada, proporcionando estimaciones precisas de los parámetros de DoLP y AoLP respectivamente. La implementación remota del sistema, junto con su diseño económico y facilidad de construcción, permite su uso en una amplia gama de aplicaciones. Una ventaja clave de nuestra propuesta es su capacidad para integrar múltiples fuentes de datos o imágenes en una sola interfaz, facilitando el análisis simultáneo de la información obtenida. Esto lo convierte en una herramienta versátil con aplicaciones potenciales en

vigilancia, monitoreo ambiental, control de procesos industriales y diagnósticos médicos. Además, debido a la simplicidad del diseño y la disponibilidad de los componentes, nuestra propuesta puede ser escalable a un sistema multivista para escenarios donde el análisis de información polarimétrica es crucial.

## Referencias

[1] J. S. Tyo, D. L. Goldstein, D. B. Chenault *et al.*, "Review of passive imaging polarimetry for remote sensing applications," Applied Optics **45**(22), 5453 (2006), https://doi.org/10.1364/AO.45.005453

[2] K. Aydin, T. A. Seliga, and V. Balaji, "Remote Sensing of Hail with a Dual Linear Polarization Radar," Journal of Applied Meteorology and Climatology **25**(10), 1475–1484 (1986), https://doi.org/10.1175/1520-0450(1986)025<1475:RSOHWA>2.0.CO;2

[3] A. R. Holt, "Some factors affecting the remote sensing of rain by polarization diversity radar in the 3- to 35-GHz frequency range," Radio Science **19**(5), 1399–1412 (1984), https://doi.org/10.1029/rs019i005p01399

[4] A. R. Dahlberg, N. J. Pust, and J. A. Shaw, "Effects of surface reflectance on skylight polarization measurements at the Mauna Loa Observatory," Optics Express **19**(17), 16008, (2011), https://doi.org/10.1364/OE.19.016008

[5] N. J. Pust and J. A. Shaw, "Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies," Applied Optics **47**(34), H190 (2008), https://doi.org/10.1364/AO.47.00H190

[6] L. M. Dahl, M. J. Tauc and J. A. Shaw, "Cloud thermodynamic phase detection using an all-sky imaging polarimeter" Proceedings SPIE Optical Engineering + Applications (2017), https://doi.org/10.1117/12.2274354

[7] T. Hashimoto, L. M. Dahl, S. A. Laurie, et al., "Camera characterization for all-sky polarization measurements during the 2017 solar eclipse," *Proceedings SPIE Optical Engineering + Applications, Polarization Science and Remote Sensing VIII* **1040706** (2017), https://doi.org/10.1117/12.2274490

[8] N. J. Pust and J. A. Shaw, "Digital all-sky polarization imaging of partly cloudy skies," Applied Optics **47**(34), H190 (2008), https://doi.org/10.1364/AO.47.00H190

[9] L. M. Eshelman, and J. A. Shaw, "Visualization of all-sky polarization images referenced in the instrument, scattering, and solar principal planes," Optical Engineering **58**(08), 082418 (2019), https://doi.org/10.1117/1.OE.58.8.082418

[10] L. M. Eshelman, M. J. Tauc, and J. A. Shaw, "All-sky polarization imaging of cloud thermodynamic phase," Optics Express **27**(3), 3528-3541 (2019), https://doi.org/10.1364/OE.27.003528

[11] L. M. Eshelman, M. J. Tauc, T. Hashimoto, *et al.*, "All-sky polarization measurements of the total solar eclipse on 21 August 2017," Proc. SPIE 10655 Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing XIII, 106550L (2018); https://doi.org/10.1117/12.2305162

[12] R. A. Chipman, W. S. T. Lam, and G. Young, Polarized Light and Optical. Systems, CRC press. (2018), https://doi.org/10.1201/9781351129121

[13] D. Goldstein, Polarized Light, CRC press. (2011), https://doi.org/10.1201/b10436