

Comprobación de la Ley de Malus: Un Estudio Experimental sobre la Polarización de la Luz

G.J. Llanos¹, J.E. Motta¹, J.D. Garzon¹

¹Laboratorio de óptica y acústica.

Departamento de física, Universidad Nacional de Colombia, Bogota.

27 de septiembre de 2024

Resumen

Este artículo aborda la comprobación experimental de la ley de Malus utilizando un montaje con una fuente de luz, dos polarizadores lineales y sensores de luz y cámara de un teléfono celular. El objetivo principal es corregir errores de no linealidad en las mediciones de la cámara del celular y verificar la dependencia entre la intensidad de la luz y el ángulo entre los polarizadores. Se realizaron varios experimentos para medir la estabilidad de la fuente de luz y la variación de la intensidad lumínica en función del ángulo. Los datos fueron capturados tanto por el sensor de luz del teléfono como por la cámara, y posteriormente procesados con el programa ImageJ. El análisis reveló discrepancias en las mediciones realizadas por la cámara debido a errores en la escala de grises, lo que fue corregido mediante un modelo de ajuste basado en la función $\sec^2 \theta$. Tras aplicar esta corrección, los resultados experimentales fueron consistentes con la ley de Malus. Además, se verificó la validez de los resultados comparando las tres componentes de color (RGB) y realizando análisis en regiones específicas de interés (ROI) y píxeles individuales.

Palabras clave: Polarización, campo eléctrico, RGB, irradiancia.

1. Introducción

1.1. Objetivos

- Corregir los procesos de no linealidad en la escala de grises provocados por el procesamiento digital de la cámara del teléfono celular.
- Estudiar el funcionamiento de un polarizador lineal.
- Comprobar experimentalmente la ley de Malus.

1.2. Marco teórico

La ley de Malus describe cómo varía la intensidad de la luz polarizada al pasar a través de un conjunto de polarizadores lineales. La luz, al ser una onda electromagnética, tiene campos eléctricos y magnéticos que oscilan perpendicularmente entre sí y a la dirección de propagación. Cuando la luz es no polarizada, las componentes del campo eléctrico vibran en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación. Sin embargo, cuando la luz se polariza, la oscilación del campo eléctrico queda restringida a un plano específico. (Hecht, 2012)

Un polarizador lineal es un dispositivo que permite la transmisión de solo una de las componentes del campo eléctrico, aquella que está alineada con su eje de transmisión. Si la luz incidente es no polarizada, al pasar por un polarizador lineal ideal, la luz transmitida estará completamente polarizada en la dirección del eje de transmisión, y su intensidad se reduce a la mitad de la intensidad original I_0 , ya que solo una de las componentes del campo eléctrico se transmite. Matemáticamente, podemos escribir esto como:

$$I' = \frac{I_0}{2}$$

Ahora, si esta luz polarizada pasa a través de un segundo polarizador, cuya orientación está inclinada un ángulo θ con respecto al eje del primer polarizador, la intensidad de la luz transmitida por este segundo polarizador seguirá la ley de Malus:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Donde I_0 es la intensidad de la luz que emerge del primer polarizador, I es la intensidad transmitida por el segundo polarizador, y θ es el ángulo entre los ejes de transmisión de los dos polarizadores. (Mejía Barbosa, s.f.)

Este resultado se puede interpretar físicamente al recordar que la luz es una onda electromagnética con un campo eléctrico que oscila en una dirección particular si está polarizada. El segundo polarizador actúa como un filtro que permite el paso de la componente del campo eléctrico alineada con su eje de transmisión. La proyección del campo eléctrico incidente sobre el eje del segundo polarizador depende del ángulo θ , y dado que la intensidad de la luz es proporcional al cuadrado de la amplitud del campo eléctrico, obtenemos la dependencia cuadrática en el coseno, es decir, $\cos^2 \theta$.

Para derivar esta expresión de manera más formal, consideremos que la luz incidente sobre el primer polarizador tiene un campo eléctrico con componentes $E_{||}$ y E_{\perp} , paralelas y perpendiculares al eje de transmisión del polarizador, respectivamente. La intensidad de la luz no polarizada se puede escribir como:

$$I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} (|E_{||}|^2 + |E_{\perp}|^2)$$

Para la luz no polarizada, $|E_{||}| = |E_{\perp}|$, por lo que:

$$I_0 = \frac{\epsilon_0 c}{2} \cdot 2|E_{||}|^2 = \epsilon_0 c |E_{||}|^2$$

Después de pasar por el primer polarizador, solo la componente $E_{||}$ paralela al eje de transmisión del polarizador es transmitida, y la intensidad se reduce a la mitad:

$$I' = \frac{I_0}{2} = \frac{\epsilon_0 c}{2} |E_{||}|^2$$

Al llegar al segundo polarizador, esta componente $E_{||}$ se proyecta sobre el eje de transmisión del segundo polarizador, que forma un ángulo θ con el eje del primero. La componente transmitida del campo eléctrico después del segundo polarizador es:

$$E''_{||} = E'_{||} \cos \theta$$

Por lo tanto, la intensidad de la luz transmitida por el segundo polarizador será:

$$I = \frac{\epsilon_0 c}{2} |E''_{||}|^2 = \frac{\epsilon_0 c}{2} |E'_{||}|^2 \cos^2 \theta$$

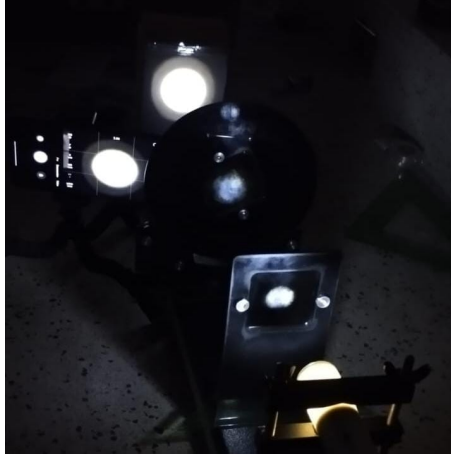
Dado que $|E'_{||}|^2$ es proporcional a la intensidad I' , obtenemos la expresión final:

$$I = I' \cos^2 \theta = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

Este resultado es una consecuencia directa de la naturaleza vectorial del campo eléctrico en una onda electromagnética y la proyección de dicho campo sobre el eje del polarizador. En términos físicos, el segundo polarizador no solo reduce la intensidad de la luz, sino que también rota el plano de vibración del campo eléctrico transmitido.

2. Detalles experimentales

2.1. Montaje



El montaje experimental constó de una linterna que se usó como fuente de luz con polarización natural, además de dos polarizadores lineales uno de ellos fijo y otro en un disco giratorio que se usó como analizador, un rectángulo de papel pergamino usado como pantalla y un teléfono celular (Xiaomi Poco F3) para la toma de datos e imágenes.

2.2. Procedimiento

El procedimiento experimental se dividió en 3 partes, la primera con la finalidad de establecer la incertidumbre en la medición utilizando el sensor de luminosidad presente en el teléfono celular.

Con la luz de la linterna apuntando directamente al sensor, se tomaron datos de intensidad lumínica respecto al tiempo para distintos intervalos de 10 s, 30 s, 1 min y 5 min. Esto para probar la estabilidad de la fuente de luz como se muestra en la figura 1.

La segunda parte consistió en tomar medidas de intensidad en función del ángulo entre los ejes de transmisión de ambos polarizadores (fijo y analizador) en pasos de 10° utilizando el sensor de luminosidad y registrándolos manualmente.

Para la tercera parte del procedimiento experimental, se repitió el proceso anterior pero registrando fotografías de la imagen en la pantalla para su posterior procesamiento. (Olarde, 2024)

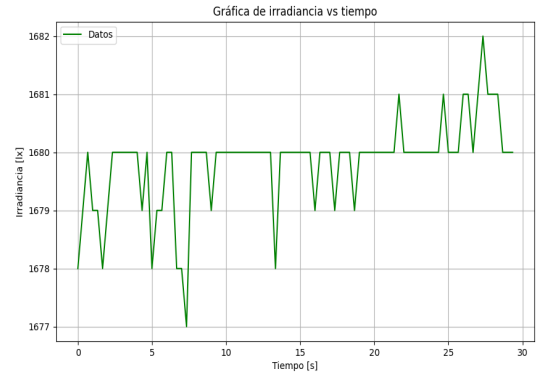
3. Resultados y análisis

Para obtener la incertidumbre de los datos de la intensidad lumínica, se utilizaron los datos de intensidad vs tiempo como se muestra en la figura 1, para el intervalo que mas se aproximara al tiempo de exposición del experimento de ley de Malus. Obteniendo así una incertidumbre (desviación estándar) de $\pm 2lx$.

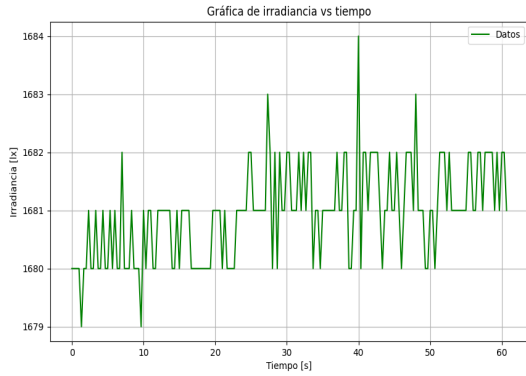
Una vez obtenida la incertidumbre de los datos se graficaron en coordenadas polares



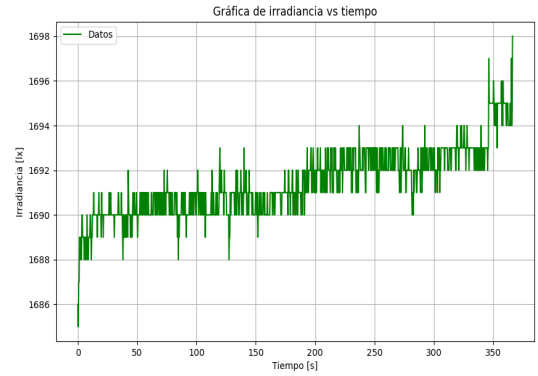
(a) Gráfica: irradiancia vs tiempo 10 segundos



(b) Gráfica: irradiancia vs tiempo 30 segundos



(c) Gráfica: irradiancia vs tiempo 1 minuto



(d) Gráfica: irradiancia vs tiempo 5 minutos

Figura 1: Intensidad luminica vs tiempo para los intervalos de tiempo: 10 s, 30 s, 1 min y 5 min.

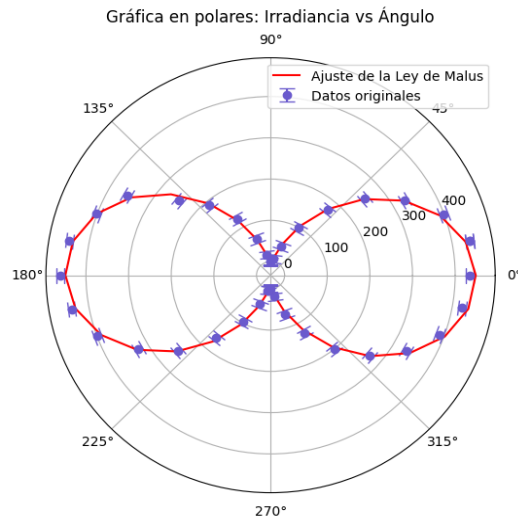


Figura 2: Medida de la intensidad lumínica usando el sensor de luz

y se realizó un ajuste a los datos de la forma

$$I = \frac{I_0}{2} \cos^2 \theta$$

obteniendo que $I_0 = (448 \pm 2) \text{ lx}$

Para la parte final del experimento, en el que se analizaron los datos tomados con la cámara del celular, se hizo el procesamiento de los datos usando el programa ImageJ.

Para una zona común entre todas las imágenes a la cual se le llamo 'ROI' se hizo la estimación de la irradiancia promedio y se calculó la desviación estándar (incertidumbre)

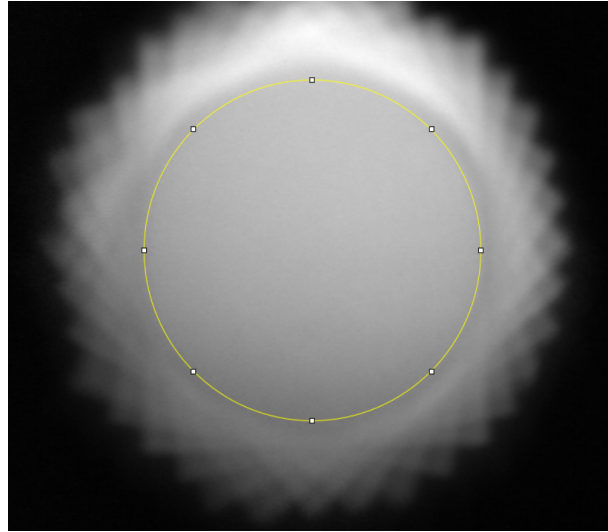


Figura 3: Gráfica: ROI

Una vez extraídos los datos del programa se graficaron en coordenadas polares y se notó que la dependencia funcional de los datos, discrepaba respecto a la forma teórica de la ley de Malus, esto debido a errores de no linealidad en la forma en la que se almacenan los datos de la escala de grises (cantidad de luz) que capta la cámara.

Este proceso se hizo con cada una de las componentes RGB de la fotografía.

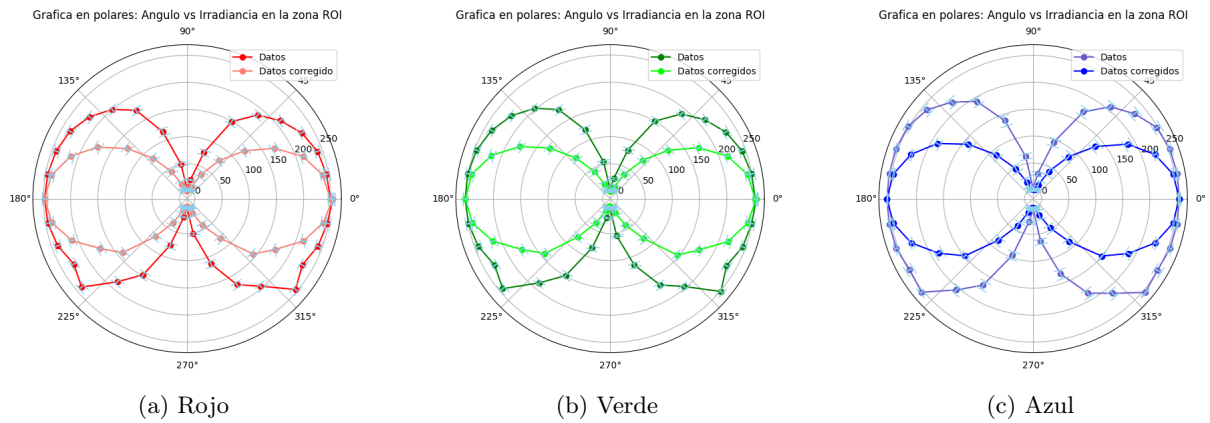


Figura 4: Medidas de la intensidad lumínica usando una cámara para cada uno de los tres componentes de color RGB en una ROI.

Al notar la discrepancia entre el sensor y la cámara buscamos como la cámara almacenaba los datos de irradiancia, para esto hicimos la razón entre los datos de la cámara con el modelo teórico de la ley de Malus esto dio como resultado una relación, a esta relación se le realizó una regresión y se encontró que los datos se modelaban con la función $\sec^2 \theta$ como se evidencia en la figura 5.

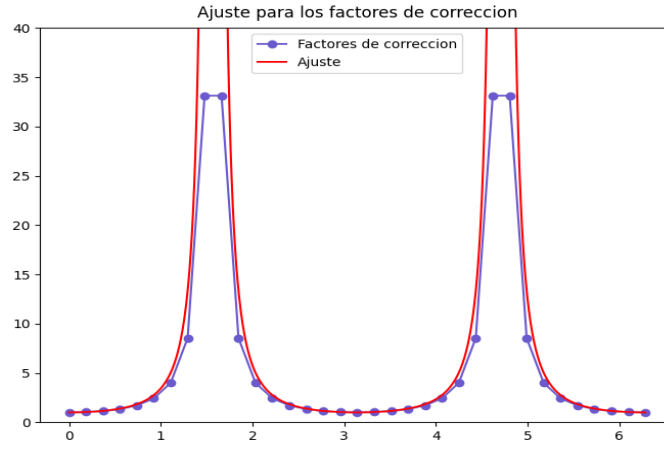


Figura 5: Gráfica: Modelo corrección de los datos

Con esto se hizo el producto de los datos de la cámara con el inverso de esta función y se consiguió con esta corrección obtener coherencia con la ley de Malus. Esta corrección esta acompañando las gráficas de los datos capturados por la cámara de las distintas componentes RGB en la Figura 4 , donde se evidencia la diferencia que esta corrección aporta a los datos.

Por ultimo se tomaron 3 píxeles individuales dentro de ROI y se repitió el análisis para para los 3 píxeles en cada una de las 3 componentes RGB como se muestra en la figura 6 y de esta forma se hizo la comprobación experimental de la ley de Malus.

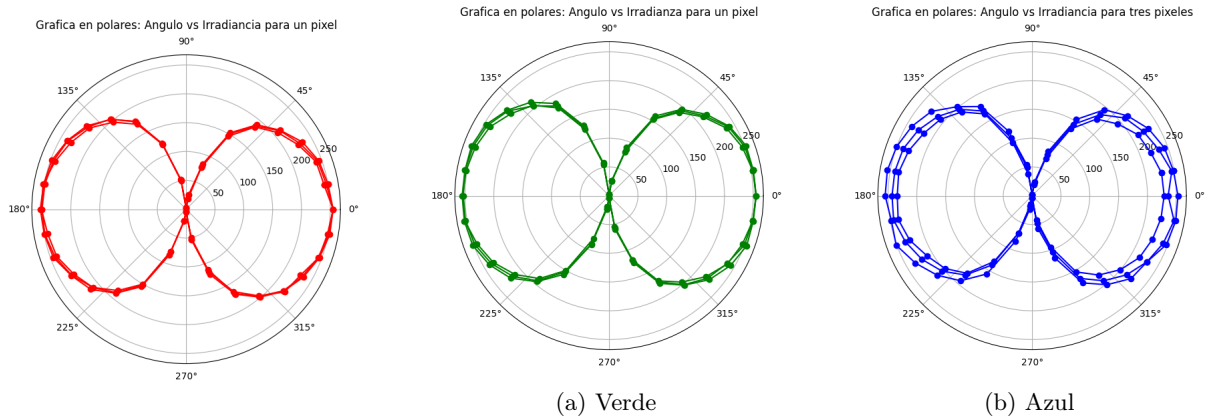


Figura 6: Medidas de la intensidad lumínica usando una cámara para cada uno de los tres componentes de color RGB con 3 píxeles.

4. Conclusiones

Se detectaron errores de no linealidad en las mediciones de la cámara del celular debido a la forma en que la cámara almacena los datos en escala de grises. Al aplicar una corrección basada en el modelo $\sec^2 \theta$, se logró ajustar los datos de manera que coincidieran con los valores teóricos esperados.

A través del montaje experimental, se comprobó que un polarizador lineal permite la transmisión de una única componente del campo eléctrico de la luz incidente, alineada con su eje de transmisión. Este comportamiento fue evidente en las mediciones realizadas, donde se observó que al pasar la luz no polarizada a través de un polarizador, la intensidad se redujo a la mitad, como se esperaba teóricamente.

El experimento confirmó que la ley de Malus describe adecuadamente la relación entre la intensidad de la luz transmitida y el ángulo entre los ejes de los polarizadores lineales, como se verificó tanto en las mediciones del sensor de luz como en las imágenes capturadas por la cámara.

Referencias

- Hecht, E. (2012). *Optics*. Pearson Education India.
- Mejía Barbosa, Y. (s.f.). Fundamentos de óptica: Curso introductorio.
- Olarte, O. (2024). *Practica 5b. polarización. la ley de malus*.