

Sonda didáctica para espectrofotometría visible

Teaching probe for visible spectrophotometry

¹Israel Jesús Orlando Guerrero*, ²Zulma Janet Hernández Paxtián, ³Miguel Ángel Sánchez Acevedo

Instituto de tecnología de los alimentos, Universidad de la cañada. Teotitlán de Flores Magón, Oaxaca, México, C.P. 68540.

Tel. (236)3720712, ext.306.

¹Tel.(238)2381014078,iorlando@unca.edu.mx, ORCID:0000-0003-4211-3938

²Tel.(236)2361055611,jpaxtian@unca.edu.mx, ORCID:0000-0002-4299-5865

³Tel.(236)236102027,masanchez@unca.edu.mx, ORCID:0000-0002-0996-0038

*Autor de correspondencia

Resumen

Las sondas empleadas en el aula para el aprendizaje de física permiten al alumno medir y desplegar variables en tiempo real. Su principal objetivo en la educación es unir la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas (STEM, por sus siglas en inglés), con el fin de mejorar el aprendizaje de los estudiantes. En esta investigación se presenta el diseño óptico y mecánico, así como el algoritmo de control, de una sonda empleada para el aprendizaje del concepto transmitancia de luz. La sonda consiste en un espectrofotómetro de un solo haz y una cámara digital conectada a una computadora. Los componentes del espectrofotómetro fueron alineados y ensamblados en una carcasa manufacturada con una impresora 3D. El desempeño de la sonda fue evaluado por medio de cuatro muestras estándares empleadas en espectroscopía, y sus gráficas de transmitancia muestran máximos característicos reportados en la literatura, lo cual demuestra un buen desempeño de la sonda para la educación STEM.

Palabras clave: Sondas; STEM; óptica; espectrofotometría visible.

Abstract

The probes used in the classroom for learning physics allow students to measure and display variables in real time. The main objective of these probes in education is to join science, technology, engineering, and mathematics (STEM), aiming to improve student learning. This research presents the optical and mechanical design, as well as the control algorithm, of a probe used for learning the concept of light transmittance. The probe consists of a single beam spectrophotometer and a digital camera connected to a computer. The components of the spectrophotometer were aligned and assembled into a housing manufactured with a 3D printer. The performance of the probe was evaluated by means of four standard samples used in spectroscopy, and its transmittance plots show characteristic maxima reported in the literature, which demonstrates a good performance of the probe for STEM education.

Keywords: Probeware; STEM; optics; spectrophotometry.

Recibido: 19 de abril de 2024

Aceptado: 06 de agosto de 2024

Publicado: 23 de octubre de 2024

Cómo citar: Orlando Guerrero, I. J., Hernández Paxtián, J. H., & Sánchez Acevedo, M. A. (2024). Sonda didáctica para espectrofotometría visible. *Acta Universitaria* 34, e4197. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2024.4197>

Introducción

La unión de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (STEM, acrónimo en inglés que hace referencia a *Science, Technology, Engineering and Mathematics*) para el aprendizaje de física es fundamental hoy en día. Esta tendencia educativa ha mostrado una buena aceptación en los jóvenes, ya que el aprendizaje no es estático; es decir, después de comprender los fundamentos matemáticos y físicos de un fenómeno, el alumno puede verificar la teoría por medio de la experimentación en el aula.

Para lo anterior, la educación STEM suele emplear tecnologías de la información como: tarjetas de adquisición de datos, cámaras, sensores, actuadores y un CPU (unidad central de procesamiento) o un móvil para el análisis de datos y su despliegue de gráficas. Este análisis de datos y despliegue de gráficas debe ser en tiempo real, con el fin de aumentar la comprensión del fenómeno físico. Las tecnologías de la información mencionadas se conjuntan y suelen tener tres nombres en la literatura: sondas (*probeware* en inglés), laboratorios basados en microcomputadoras (*microcomputer based labs*) y laboratorios basados en calculadoras (*calculator based labs*), aunque en este artículo les llamaremos simplemente sondas (Albert, 2012).

Existen cinco empresas a nivel mundial que son líderes en el desarrollo y fabricación de sondas, estas son: Phywe, Fourier Systems, Vernier Science Education, LabDisk y LabQuest (Shapovalov *et al.*, 2022), las cuales no solo desarrollan sondas, sino también la conectividad y el *software* para una computadora o un dispositivo móvil. Los altos costos de las sondas, el *software* y su importación, es decir la centralización de esta tecnología en países del primer mundo, ha llevado a que estas sondas no sean empleadas en la educación de tipo STEM en zonas rurales de nuestro país.

Por otro lado, la impresión 3D ha facilitado la fabricación y descentralización de sondas, ya que reduce el costo de fabricación considerablemente y la repetibilidad de armado por parte de los usuarios finales, esto último se puede llevar a cabo al compartir el archivo STL (lenguaje triangular estándar) en comunidades de impresión 3D. Este archivo contiene toda la información sobre el diseño CAD (diseño asistido por computadora), pero mediante triángulos enlazados, los cuales describen la estructura del objeto para ser impreso, empleando algún tipo de plástico, por ejemplo, PLA (ácido poliláctico).

Espectrofotometría en el aula

La descomposición de la luz blanca en sus diferentes colores (longitudes de onda) es uno de los experimentos visuales más simples e interesantes que se pueden llevar a cabo en el aula (Yanchapanta-Bastidas, 2020). El alumno se asombra al observar la gama de colores ocultos (fantasma-espectro) que son develados al pasar luz blanca a través de un prisma o una rejilla de difracción. Este experimento, uno de los más famosos de todos los tiempos, motivó a los físicos a responder preguntas fundamentales como: ¿Qué es la luz? y ¿Cómo interacciona la luz con la materia? Esta última pregunta dio origen a la espectrofotometría, la cual es una técnica ampliamente utilizada para el análisis cuantitativo de numerosos compuestos debido a su sencillez operativa y exactitud. Con dicha técnica es posible medir la concentración de cierta sustancia a partir de la cantidad de luz absorbida, en el rango del espectro electromagnético visible (Vis). El diseño óptico y las matemáticas relacionadas al espectrofotómetro se basan en las leyes de difracción y la ley de Lambert-Beer (Chaianantakul, 2018; Popov *et al.*, 1991; Vernon, 1960), estas son presentadas a continuación.

Diseño óptico. La mayoría de los espectrofotómetros (Figura 1) basan su diseño óptico en cuatro componentes principalmente: 1) una fuente de luz (fuente de tungsteno-halógeno); 2) un monocromador, el cual consta de una red de difracción y cuya función principal es generar ondas planas secundarias, las cuales interfieren constructiva o destructivamente en el plano del observador. Lo anterior genera órdenes de difracción que son seleccionados mediante el giro controlado de la rejilla de difracción. Para el caso de iluminación incoherente, estos órdenes de difracción contienen longitudes de onda dentro del espectro visible, por lo que un conjunto de longitudes de onda estrecho puede ser filtrado por medio de una abertura, generando así un haz de luz casi coherente; 3) un divisor de haz, el cual divide la luz coherente del monocromador en dos haces, uno incide sobre la muestra a analizar y otro sirve como referencia I_r ; y 4) dos fotodetectores, uno mide la intensidad de luz después de atravesar la muestra I_m y el otro mide la intensidad de luz del haz de referencia. Una comparación de ambas intensidades medidas por los fotodetectores (I_r / I_m) para una longitud de onda indica la cantidad de luz transmitida por la sustancia. Un barrido de longitudes de onda en el espectro visible se puede realizar con el fin de observar cuáles son las longitudes de onda que exhiben un máximo de transmitancia, esto con el fin de obtener información de la concentración y el coeficiente de absorción molar del analito (Wilson & Wilson, 2017). El espectrofotómetro descrito anteriormente resulta ser robusto, muy costoso y difícil de trasportar, esto se debe a las siguientes razones:

- Para obtener un haz de luz casi coherente, la rejilla de difracción debe girar por medio de un motor a pasos, lo cual involucra el empleo de tarjetas de adquisición de datos y software.
- El dividir el haz coherente en dos caminos aumenta los componentes ópticos, la sensibilidad y el tamaño del instrumento.
- Utilizar fotodetectores conlleva a realizar un barrido de longitudes de onda en el Vis, lo cual aumenta el tiempo de análisis en las muestras.

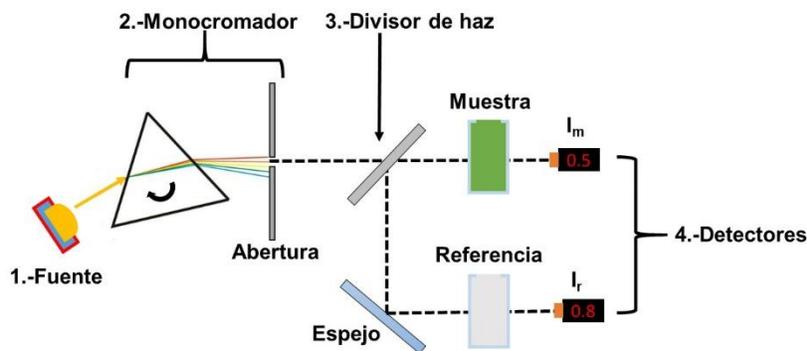


Figura 1. Diseño óptico de un espectrofotómetro de doble haz.
Fuente: Elaboración propia.

Matemáticas. Un espectrofotómetro se sustenta en la teoría de difracción de la luz, en especial en la difracción que ocurre en rejillas de difracción, las cuales son un conjunto repetitivo de aberturas igualmente espaciadas a una distancia (d); estas rejillas producen alteraciones periódicas en la fase y/o amplitud de la onda luminosa en estudio. Es decir, la red puede separar un haz de luz incidente a un ángulo A en sus colores o longitudes de onda constituyentes. Por ejemplo, si un haz de luz monocromática incide normalmente sobre una red, las ondas emergentes de cada rendija están en fase, y sobre una pantalla colocada a gran distancia se formará un diagrama de interferencia debido a un gran número de focos igualmente espaciados. Las ondas interfieren constructivamente cuando la diferencia de camino sea un múltiplo entero de la longitud de onda; es decir, los máximos de interferencia estarán localizados a un ángulo B con respecto de la normal de la rejilla de difracción, y su ubicación se podrá obtener por medio de la siguiente ecuación:

$$\pm m\lambda = d(\sin A + \sin B) \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

donde m indica el orden del máximo interferencial y λ es la longitud de onda incidente. La ecuación 1 se denomina ecuación de la red (Palmer & Loewen, 2015). En el caso de luz incidente compuesta por varias longitudes de onda (luz blanca), cada λ tendrá diferentes valores de B , por lo que, si se coloca una pantalla, se observará el espectro continuo (Figura 2). Los órdenes pueden aparecer mezclados; por ejemplo, una línea espectral de tercer orden correspondiente a una determinada longitud de onda puede aparecer antes que otra línea de segundo orden de distinta longitud de onda.

Por lo general, se bloquean los órdenes superiores y solo se filtra el primer orden, positivo o negativo. Lo anterior se realiza empleando una abertura (Botero-Valencia *et al.*, 2019; Farooq *et al.*, 2015; Yan *et al.*, 2019).

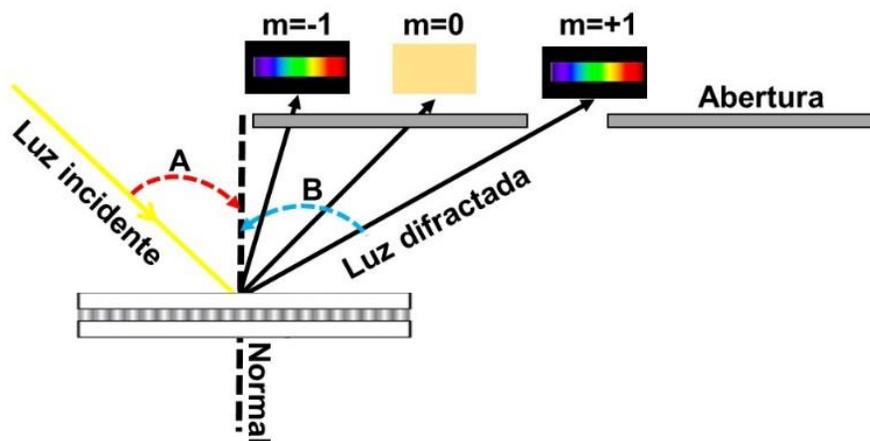


Figura 2. Espectro continuo generado bajo luz incoherente.
Fuente: Elaboración propia.

Espectrofotómetros de un solo haz

Una estrategia de reducir el tamaño y costo del espectrofotómetro es evitar el uso de monocromadores y fotodetectores (Figura 3a), los cuales pueden ser sustituidos por una rejilla de difracción en transmisión (Figura 3b), la cual genera un abanico de longitudes de onda (colores) del espectro continuo que puede ser capturado en su totalidad por una CCD (dispositivo de carga acoplada) (Figura 3b). Históricamente, la utilización de fotodetectores tiene una justificación, ya que, cuando surgieron los primeros espectrofotómetros, las cámaras digitales con un chip CCD estaban en plena investigación, por tal motivo se optó por utilizar fotodetectores y, por ende, un monocromador (Davis & Ohno 2010; Pearce 2012).

En este artículo proponemos una sonda didáctica que puede ser empleada en el aula para comprender los principios físicos de la espectrometría, tales como: descomposición de la luz/longitud de onda, radiación ultravioleta, espectro visible, radiación infrarroja y transmitancia. Esta sonda consta de un espectro de un solo haz, montado sobre una carcasa manufacturada en una impresora 3D y un algoritmo que permite el despliegue de gráficas de transmitancia en tiempo real.

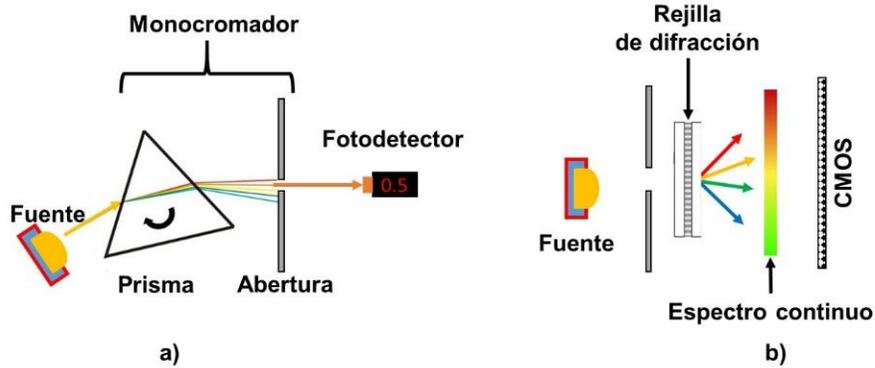


Figura 3. Comparación de la captura del espectro Vis (a) de forma puntual y (b) de forma continua.
Fuente: Elaboración propia.

Materiales y métodos

El diseño clásico del espectrofotómetro puede ser modificado gracias a la detección múltiple de longitudes de onda que podemos llevar a cabo con una CMOS (semiconductor complementario de óxido metálico), lo que evita el uso de monocromadores y reduce el costo de los espectrofotómetros. El espectrofotómetro (Figura 4a) es de un solo camino óptico y su funcionamiento es explicado a continuación.

Luz incoherente colimada proveniente de un led blanco ultrabrillante (600 mcd-800 mcd) es incidido sobre una abertura cuadrada de tamaño 10 mm x 5 mm. Lo anterior genera un haz de luz, el cual atraviesa la sustancia a analizar. Debido al color de la sustancia, esta solo transmite ciertas longitudes de onda. Estos remanentes de longitudes atraviesan una rejilla de transmisión visible (GT13-12 thorlabs) que contiene 1200 Líneas/mm. Esta rejilla genera un espectro continuo enfocado por una lente de acoplamiento micro esférico (modelo A439 thorlabs, $f = 0.71\text{mm}$, 0.60 NA) sobre el chip CMOS de una cámara modelo PC-320425, con 1280 x 1024 pixeles, y un tamaño de pixel de $5.2\ \mu\text{m}$.

La rejilla de difracción, la lente y la cámara son acopladas en una sola pieza que es sujeta por medio de soportes a la carcasa del espectrofotómetro. Esta pieza puede variar su ángulo de inclinación con respecto al haz incidente, lo cual permite obtener el orden uno del espectro continuo (Figura 4a y 4b).

La captura en tiempo real del espectro continuo se realizó por la conexión de la cámara, vía USB, a una PC, la cual contiene el algoritmo de control propuesto en esta investigación, que a su vez despliega imágenes del espectro continuo. Cabe mencionar que este algoritmo fue escrito en el *software* Labview y la librería para procesamiento de imágenes Visión 8.6, la cual permite recortar y extraer componentes RGB de la imagen del espectro.

Para el encendido del Led ultrabrillante se emplea un circuito de led, el cual consiste en la conexión en serie de una pila de botón de 3V, con el led ultrabrillante y una resistencia limitadora de corriente de $390\ \Omega$.

Una impresora modelo Anet 4 y filamento plástico PLA fue empleada para imprimir la carcasa del espectrofotómetro. El diseño CAD se muestra en la Figura 4b, donde se observan los soportes para la pila de botón, circuito protector y led ultrabrillante. Para evitar que llegue luz espuria al soluto, una abertura rectangular de 10 mm x 5 mm fue impresa sobre en una pieza rectangular del ancho de la carcasa (ver vista Izquierda). Para garantizar que solo se reciba luz proveniente de la muestra a analizar, se empalmó el contenedor de la cubeta, seguida de una guía de onda y de la cámara.

En la base de la cámara, la rejilla de difracción y la lente fueron colocados delante de la CMOS de la cámara, la cual fue montada sobre una base giratoria para obtener el ángulo máximo de interferencia de 36.9° , y así observar el orden uno del espectro continuo. Las perspectivas superior e izquierda de la carcasa son mostradas en la Figura 4b para un mejor entendimiento de la configuración del espectrofotómetro.

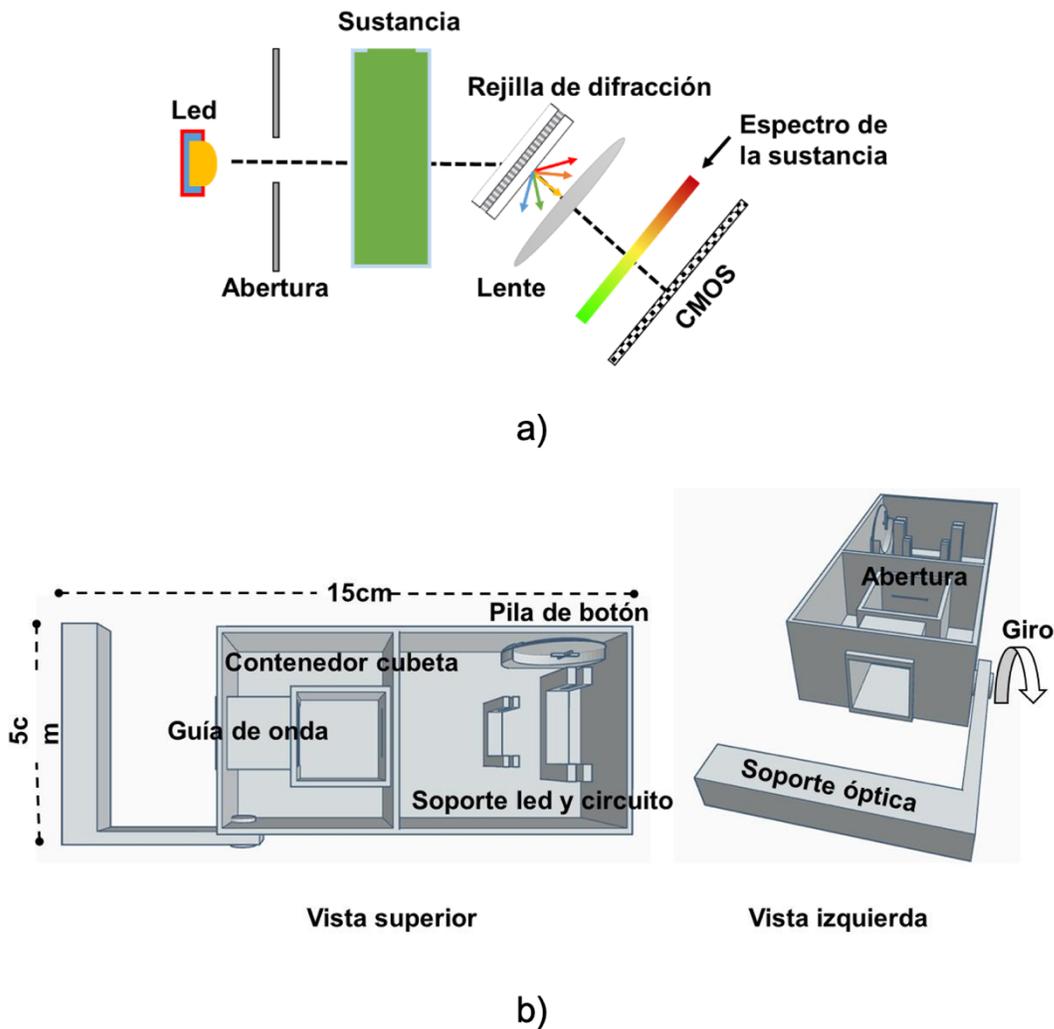


Figura 4. a) Camino óptico y componentes; b) diseño CAD de carcasa del espectrofotómetro visible.
Fuente: Elaboración propia.

Algoritmo

El comportamiento de transmitancia, para diferentes sustancias de color, puede ser evaluada por medio del despliegue de gráficas unidimensionales. Este despliegue, para el caso de la captura de un espectro continuo digital, ha sido poco estudiado debido a que habitualmente se emplean dispositivos analógicos para la captura de la intensidad transmitida. En esta investigación se propone un algoritmo que obtiene valores de transmitancia para múltiples longitudes de onda, es decir, un vector de transmitancia obtenido a partir del espectrofotómetro propuesto. Este algoritmo consta de cuatro etapas, las cuales son mostradas de forma gráfica en la Figura 5, con el objetivo de ejemplificar el procedimiento para obtener el vector de transmitancia.

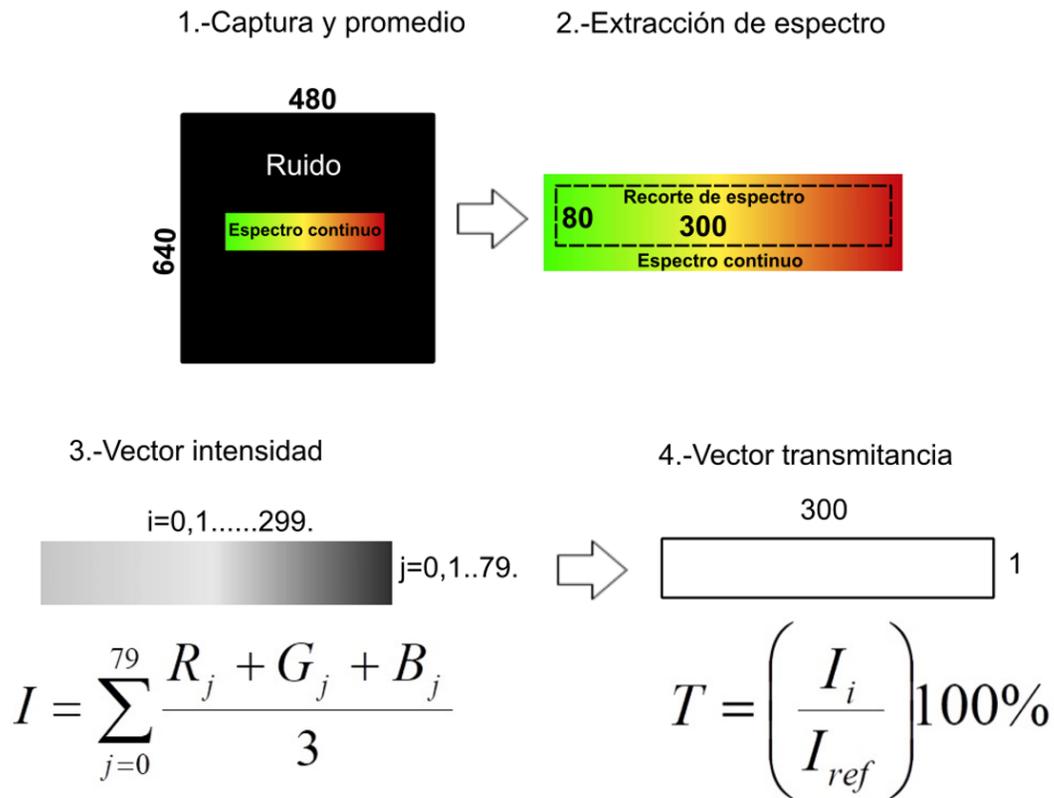


Figura 5. Proceso que realiza el algoritmo propuesto para obtener vectores de intensidad y transmitancia.
Fuente: Elaboración propia.

La descripción de cada etapa se resume a continuación:

1. Captura y promedio. El tamaño de la imagen capturada del espectro continuo se fijó en 480 x 640 píxeles debido a que este se encuentra inmerso en un fondo negro (imagen de la apertura del espectrofotómetro). Para reducir el ruido electrónico generado por la CMOS, se capturaron veinte imágenes y se promediaron, esto logra reducir el ruido (7.3 ± 2 píxeles en promedio) y la relación señal a ruido de la imagen del espectro continuo a procesar.

- Extracción de espectro. Un espectro limpio de ruido, es decir, sin la parte oscura que lo rodea, es obtenido al recortar una sub-imagen de tamaño de 300 pixeles de ancho por 80 pixeles de largo. La condición que se consideró para el recorte fue abarcar lo más posible del espectro continuo original.
- Vector intensidad. Las imágenes correspondientes a sus componentes rojas, verde y azul de la imagen recortada del espectro continuo son extraídas. Estas imágenes son empleadas para el cálculo de una imagen intensidad como sigue: Se accede a cada elemento columna de las imágenes RGB desde $j = 0$ hasta $j = 79$. Estos valores son promediados y representan un vector de intensidad desde $i = 0$ hasta $i = 299$. La ecuación que engloba este proceso es la siguiente:

$$I = \sum_{j=0}^{79} \frac{R_j + G_j + B_j}{3} \quad (2)$$

donde R_j , G_j y B_j son los valores columnas de las componentes espectrales, mientras que I representa el vector intensidad de tamaño 300×1 .

- Vector transmitancia. Cada valor del vector de intensidad es dividido por un valor de intensidad de referencia, el cual fue de 215 en una escala de grises. Se observó experimentalmente que este valor no satura la cámara, y se obtiene un espectro continuo nítido. Finalmente, estos cocientes son multiplicados por 100%, con lo que se obtiene la transmitancia. Esto se realiza desde $i = 0$ hasta $i = 299$. La ecuación siguiente ejemplifica el proceso realizado.

$$T = \left(\frac{I_i}{I_{ref}} \right) 100\% \quad (3)$$

donde I_i es el valor intensidad y $I_{ref} = 215$, mientras que T representa el vector de transmitancia. Este vector de transmitancia puede ser graficado en un plano cartesiano, donde el eje vertical representa el porcentaje de transmitancia y el eje x representa el número de pixeles. Para convertir número de pixeles a longitud de onda se emplea el espectro de un estándar, que en nuestro caso fue el espectro del led blanco.

Resultados

En la Figura 6 se muestra una imagen del prototipo del espectrofotómetro digital, el cual tiene un tamaño de 5 cm de ancho por 15 cm de largo. En la parte inferior de la cámara se observa la pieza que varía el ángulo de incidencia con respecto al haz proveniente del diodo led; la imagen del espectro está enfocada sobre la CMOS. Como ya se mencionó, la rejilla, la lente y la CMOS se encuentran empaquetadas en una sola pieza, y son acopladas por medio de un cilindro a la estructura del espectrofotómetro, lo cual permite trabajar en total oscuridad.



Figura 6. Espectrofotómetro digital visto desde la parte superior y la ubicación espacial de sus componentes.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 7 muestra la imagen digital del espectro continuo obtenido con el prototipo. Como puede observarse, el ruido de la cámara se hace presente, el cual tiene un promedio de 13.4 en una escala de grises. El cuadro negro sobre el espectro indica la matriz (300 x 80 pixeles) del espectro extraído, la cual es empleada para el cálculo de transmitancia.

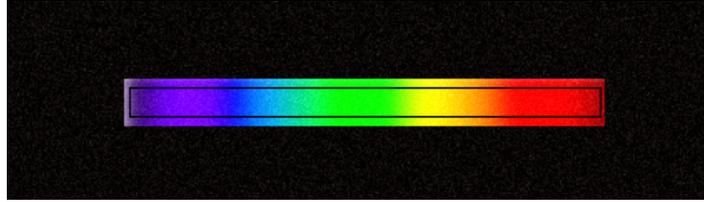


Figura 7. Espectro continuo obtenido por el espectrofotómetro. El cuadro negro marca el área extraída (300 x 80 pixeles) empleada para obtener el vector de transmitancia.
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 8b se muestran la gráfica de transmitancia contra pixeles del led blanco, el cual funge como espectro estándar en nuestro sistema. Sobre esta gráfica se marcaron dos picos característicos de máxima transmitancia, los cuales corresponden a 450 nm para luz azul y 550 nm para luz amarilla. Con estos valores y con la gráfica del espectro estándar se encontraron las siguientes relaciones: 450 nm equivalen a 50 pixeles y 550 nm equivalen a 150 pixeles. Aplicando la ecuación punto pendiente a las relaciones anteriores, se obtuvo la siguiente ecuación lineal (Figura 8a):

$$\lambda = (1\text{nm/pixel})(\#\text{pixel}) + 400\text{nm} \quad (4)$$

donde λ es la longitud de onda, (1nm/pixel) es la pendiente de la ecuación lineal, $(\#\text{pixel})$ representa la ubicación de un pixel arbitrario en la gráfica del espectro y 400 nm es la intersección en el eje.

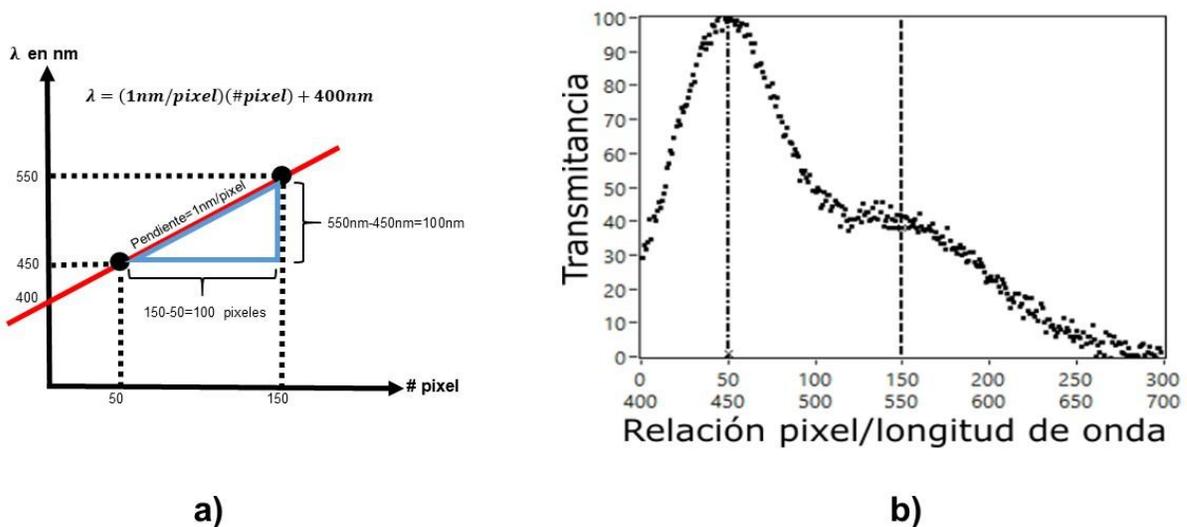


Figura 8. (a) Gráfica que muestra la relación de longitud de onda contra espectro; (b) Espectro estándar del led blanco empleado en el prototipo. Las líneas punteadas indican los picos característicos de máxima transmitancia.
Fuente: Elaboración propia.

El desempeño del espectrofotómetro fue probado empleando tres colorantes alimentarios: el Blue No. 1, Green No. 3, Red No. 40, y una mezcla de colorantes azul y verde. Para cada colorante se preparó una solución stock de 10 ml y estos fueron diluidos en agua destilada, en las proporciones siguientes (ml Stock/mlwater): 8 ml/2 ml, 6 ml/4 ml, 4 ml/6 ml y 2 ml/8 ml.

El espectro continuo de cada disolución se analizó de forma individual empleando el espectrofotómetro. Se observó que para disoluciones 8 ml/2 ml, el espectro era poco visible (valor promedio de pixel de 10.25), mientras que para las disoluciones de 2 ml/8 ml el espectro saturaba la cámara (valor promedio de pixel de 255). Se encontró que las disoluciones de 6 ml/4 ml y 4 ml/6 ml generaban espectros nítidos. Por lo anterior, los colorantes Blue No. 1, Green No. 3 y Red No. 40 fueron diluidos en la proporción de 6 ml/4 ml, mientras que la mezcla de colorantes azul y verde fueron diluidos en una proporción de 4 ml/6 ml.

Cabe aclarar que espectros continuos de sustancias muy concentradas o muy diluidas pueden ser medidas si se aumenta o disminuye la intensidad del led, lo cual aumenta el rango de medición del espectrofotómetro. Para el conjunto de disoluciones que cumplían los criterios establecidos, se capturaron 20 imágenes de su espectro continuo y se promediaron. A esta última imagen se le aplicó el algoritmo propuesto, obteniendo un máximo de transmitancia en 478 nm y no transmitancia de 525 nm a 700 nm. Para Blue No. 1, el pico máximo ocurrió en 528 nm, mientras que para Red No. 40 el pico resultó ser en 642 nm, y no transmitancia de 400 nm a 505 nm. En el espectro para la mezcla de colorantes se pueden observar dos picos provenientes de Blue No. 1 y Green No. 3 situados en 450 nm y 530 nm, respectivamente. Para mayor referencia, los resultados descritos son mostrados en la Figura 9. Los recuadros en los espectros de los colorantes son referencias de filtros de colores azul, verde y rojo, obtenidos con el espectrofotómetro USB2000+VIS-NIR-ES de Ocean Optics (Gilbert & Haeberli, 2007), los cuales confirman el correcto funcionamiento del espectrofotómetro propuesto.

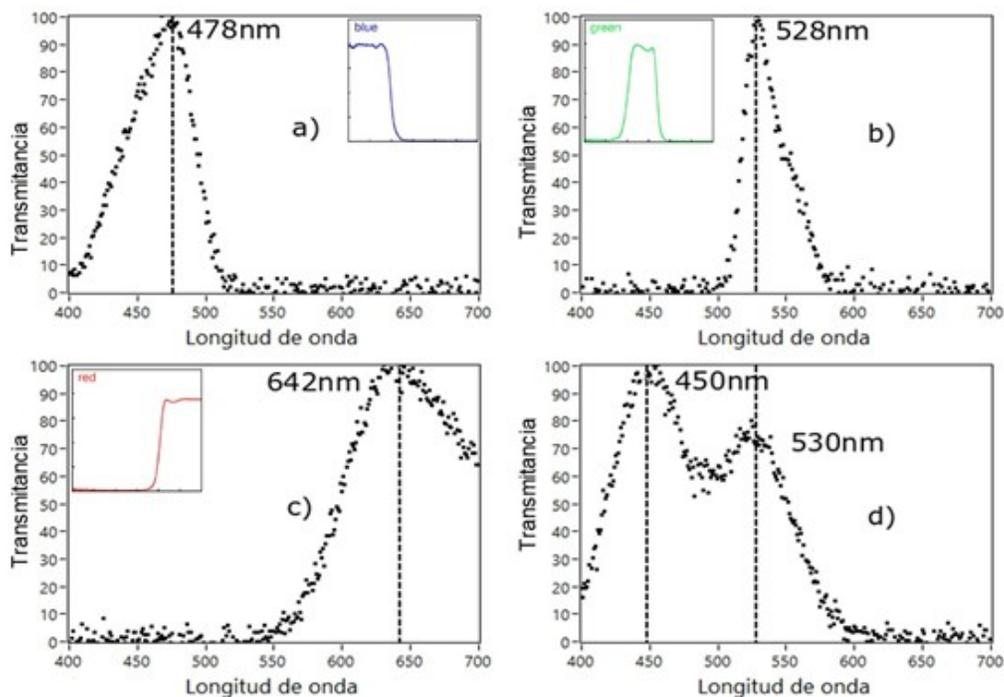


Figura 9. Espectros normalizados de las disoluciones 4 ml/6 ml para Blue No. 1, Green No. 3, Red No. 40, y mezcla de colorantes azul y verde. Los recuadros son espectros de referencia de filtros de colores azul, verde y rojo, obtenidos con el espectrofotómetro USB2000+VIS-NIR-ES de Ocean Optics.

Fuente: Elaboración propia.

Discusión

Con los resultados obtenidos fue posible analizar de forma cuantitativa el desempeño de la sonda, esto se logró analizando las gráficas de los espectros de los colorantes, los cuales muestran picos característicos de máxima transmitancia para un determinado color o la mezcla de dos colores. Lo anterior ha sido reportado por diferentes autores que han empleado espectrofotómetros comerciales para la educación en el área de química analítica (Gräb & Geidel, 2019; Thomasson *et al.*, 1998). Ellos comentan que cuando el alumno relaciona el color con ausencia de transmitancia y máxima transmitancia, este es capaz de comprender mejor el concepto de longitud de onda y correlacionarlo con los conocimientos teóricos. Esta correlación mejora la comprensión del comportamiento de la luz como onda electromagnética. A continuación, se discuten las ventajas y desventajas de la sonda propuesta.

Ventajas y desventajas

Ventajas: Debido al advenimiento de las tendencias de *software* libre, *hardware* libre e impresión 3D, la tecnología de sondas didácticas para la educación se está descentralizando. Estas tendencias han generado la formación de consorcios profesionales que fomentan la generación de *hardware* científico libre. La sonda presentada en este artículo forma parte del movimiento llamado "hágalo usted mismo" (Wenzel, 2023), abreviado en el idioma inglés como DIY (*Do It Yourself*). Cabe mencionar que el diseño CAD de la carcasa de la sonda propuesta se encuentra disponible en el sitio web de Tinkercad y puede ser copiado y modificado por cualquier usuario¹.

Por otro lado, el algoritmo para calcular el espectro es fácil de implementar en cualquier lenguaje de código abierto; es decir, las funciones de capturar, recortar y extraer componentes RGB son operaciones básicas de procesamiento de imágenes. Por lo anterior, los autores consideran que la imagen que ejemplifica el proceso para obtener vectores de intensidad y transmitancia es suficiente para que otra persona pueda replicar el algoritmo en cualquier lenguaje de programación.

Otra ventaja que presenta la sonda es el costo de fabricación. A continuación, se muestra una tabla comparativa de tres empresas que manejan espectrofotómetros similares y los costos de los componentes involucrados en nuestra propuesta.

Tabla 1. Comparación de costos de compañías que ofrecen sondas similares a la propuesta en esta investigación.

Compañía	Modelo	Costo de sonda
Phywe	Pro LED	\$18 675.18
Vernier	Go Direct SpectroVis Plus	\$15 328.18
Ocean optics	USB2000	\$23 558.14
Sonda propuesta	Sonda didáctica para espectrofotometría visible	1.-Carcasa \$50 2.-Led ultrabrillante \$12 3.-Rejilla de transmisión visible \$1675 4.-Lente esférico \$858 5.-Cámara \$509 Total: \$3104

Fuente: Elaboración propia.

¹ <https://www.tinkercad.com/things/358jv0SDyxm-espectrofotometro/edit>

Desventajas: Por otro lado, el diseño de la sonda está limitada por la intensidad proporcionada por el led ultrabrillante, por lo que sustancias con alta concentración no podrían obtener su espectro. Sin embargo, se podría añadir una fuente de tungsteno, lo cual solucionaría este inconveniente; sin embargo, el diseño de la carcasa cambiaría, ya que se requeriría un compartimiento que soporte el calor emitido por fuente de tungsteno. También, cabe mencionar que el algoritmo está diseñado solo para el despliegue de gráficas de transmitancia, por lo que para obtener curvas de calibración, se requerirá cambiar el algoritmo para añadir esta funcionalidad.

Conclusiones

El desarrollo de una sonda para el aprendizaje de espectrofotometría fue expuesto en este artículo. Las principales cualidades son las siguientes. El vector transmitancia, obtenido a través del algoritmo propuesto, mostró un comportamiento esperado para los colorantes alimentarios analizados. Como se observa en las gráficas, se presenta transmitancia en su color correspondiente, mientras que no existe transmitancia en su color complementario, lo anterior es muy parecido a los filtros de luz. Por otro lado, la estrategia de recortar el espectro continuo permitió disminuir ruido y obtener gráficas definidas de transmitancia. Además, la conjunción de la rejilla de difracción, lente y cámara en una sola pieza permitió facilitar el alineamiento al haz incidente a un grado de 36.9° , obteniendo un espectro continuo y nítido, poco aberrado, el cual contiene la información del soluto analizado. Finalmente, se observó que, para sustancias muy concentradas o diluidas, la intensidad incidente debe ser modificada y, por ende, también el valor de referencia al que se divide el vector de intensidad. Los autores pensamos que esta deficiencia del espectrofotómetro propuesto puede ser corregida empleando una cámara con una mayor sensibilidad y sustituir el led ultrabrillante por una fuente de tungsteno.

Conflicto de interés

Los autores no tienen conflictos de interés con instituciones u organizaciones gubernamentales, académicas o privadas relacionadas con los temas que trata esta investigación.

Referencias

- Albert, D. R., Todt, M. A., & Davis, H. F. (2012). A low-cost quantitative absorption spectrophotometer. *Journal of Chemical Education*, 89(11), 1432-1435. <https://doi.org/10.1021/ed200829d>
- Botero-Valencia, J. S., Valencia-Aguirre, J., Durmus, D., & Davis, W. (2019). Multi-channel low-cost light spectrum measurement using a multilayer perceptron. *Energy and Buildings*, 199, 579-587. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.07.026>
- Chaianantakul, N., Wutthi, K., Kamput, N., Pramanpol, N., Janphuang, P., Pummara, W., Phimon, K., & Phatthanakun, R. (2018). Development of mini-spectrophotometer for determination of plasma glucose. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 204, 670-676. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2018.06.107>
- Davis, W., & Ohno, Y. (2010). Color quality scale. *Optical Engineering*, 49(3), 033602. <https://doi.org/10.1117/1.3360335>
- Farooq, M. U., Waseem, M., Mazhar, S., Khairi, A., & Kamal, T. (2015). A review on internet of things (IoT). *International Journal of Computer Applications*, 113(1), 1-7. <https://doi.org/10.5120/19787-1571>
- Gilbert, P. U. P. A., & Haerberli, W. (2007). Experiments on subtractive color mixing with a spectrophotometer. *American Journal of Physics*, 75(4), 313-319. <https://doi.org/10.1119/1.2431654>

- Gräb, P., & Geidel, E. (2019). Spectroscopic studies of food colorings. *World Journal of Chemical Education*, 7(2), 136-144. <https://doi.org/10.12691/wjce-7-2-13>
- Palmer, C., & Loewen, E. G. (2005). *Diffraction grating handbook*. Newport.
- Pearce, J. M. (2012). Building research equipment with free, open-source hardware. *Science*, 337(6100), 1303-1304. <https://doi.org/10.1126/science.1228183>
- Popov, E. K., Tsonev, L. V., & Loewen, E. G. (1991). Scalar theory of transmission relief gratings. *Optics Communications*, 80(5-6), 307-311. [https://doi.org/10.1016/0030-4018\(91\)90414-9](https://doi.org/10.1016/0030-4018(91)90414-9)
- Shapovalov, Y. B., Bilyk, Z. I., Usenko, S. A., & Shapovalov, V. B. (2022, June). Systematic analysis of digital tools to provide STEM and science education. *Journal of Physics: Conference Series*, 2288(1), 2288. IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2288/1/012032>
- Thomasson, K. A., Lofthus-Herschman, S., Humbert, M., & Kulevsky, N. (1998). Applying statistics in the undergraduate chemistry laboratory: experiments with food dyes. *Journal of Chemical Education*, 75(2), 231. <https://doi.org/10.1021/ed075p231>
- Vernon, L. P. (1960). Spectrophotometric determination of chlorophylls and pheophytins in plant extracts. *Analytical Chemistry*, 32(9), 1144-1150. <https://doi.org/10.1021/ac60165a029>
- Wenzel, T. (2023). Open hardware: From DIY trend to global transformation in access to laboratory equipment. *PLoS Biology*, 21(1), e3001931. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3001931.t001>
- Wilson, M. V., & Wilson, E. (2017). Authentic performance in the instrumental analysis laboratory: Building a visible spectrophotometer prototype. *Journal of Chemical Education*, 94(1), 44-51. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.6b00515.17>
- Yan, J. C., Ren, J., Ren, L. L., Jian, J. M., Yang, Y., Yang, S. F., & Ren, T. L. (2019). Development of a portable setup using a miniaturized and high precision colorimeter for the estimation of phosphate in natural water. *Analytica Chimica Acta*, 1058, 70-79. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.01.030>
- Yanchapanta-Bastidas, V. N., Ormaza-Hugo, R. M., Sáez-Paguay, M. Á., & Pachacama-Choca, R. W. (2020). Construcción de un espectrómetro casero para el análisis de espectros de luz, mediante el software Spectral Workbench. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 5(7), 209-222. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7518064>