VOLUMEN 48
XXXI Verano De la Ciencia
ISSN 2395-9797
www.jovenesenlaciencia.ugto.mx

Microláseres flotantes: Caracterización óptica de microgotas fluorescentes en el aire

Sofía Czestochowa Águila Heredia[1], Uriel Alessandro Barajas Sanchez, Dr. Jonathan Ulises Álvarez Martínez, Dr. Rigoberto Castro-Beltrán[2*]

[1]Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León,Universidad de Guanajuato, Álvaro Obregón 308, Centro, CP 37000.
[2]División de Ciencias e Ingenierías, Universidad de Guanajuato, Sede Campestre II, Av. Eugenio Garza Sada No.572, Fracc. Lomas del Campestre, CP 37150.
sc.aguilaheredia@ugto.mx, ua.barajassanchez@ugto.mx, ju.alvarez@ugto.mx, cbrigoberto@fisica.ugto.mx*

Resumen

En este trabajo se presenta la caracterización visual de microcavidades levitadas en el aire mediante un sistema acústico tipo TinyLev de 36 transductores. Las cavidades consisten en microgotas de agua (con diámetros desde 500 µm hasta 2 mm) dopadas con Rodamina B (colorante fluorescente). Al ser excitadas de manera continua con un láser de 532 nm, las gotas fluorescen y actúan como microguías de onda, confinando y guiando la luz en su periferia. Mediante videomicroscopía y técnicas de procesamiento digital de imágenes, se capturó y analizó los patrones visuales de la luz soportada en su interior. Finalmente, estos resultados experimentales se contrastaron con el trazado y comportamiento de rayos de luz dentro de la microcavidad a partir de la ley de refracción óptica.

Palabras clave: microláseres; levitación acústica.

Introducción

En términos de tecnología actual, fabricar dispositivos a escala milimétrica y submilimétrica (más pequeños que el grosor de un cabello) representa un reto extraordinario. Normalmente, para crear cavidades ópticas que controlen la luz con estas dimensiones y escalas, se requieren laboratorios avanzados y procesos muy costosos experimentalmente, como escritura láser directa o fotolitografía (Barajas-Sánchez, *et al.*, 2025; Chen, *et al.*, 2017). Además, estos métodos tradicionales de fabricación atan los componentes a un chip de estado sólido, limitando su movimiento.

Para superar estas barreras, la levitación acústica ha surgido como una alternativa novedosa. Utilizando un dispositivo accesible llamado Tiny*Lev* (del inglés *Levitador pequeño*) el cual es impreso en 3D con 36 pequeños transductores ultrasónicos, con él es posible generar ondas de sonido que atrapan y sostienen microgotas de agua en el aire sin necesidad de tocarlas. Al flotar libremente, la tensión superficial del agua moldea la gota de forma natural, creando una esfera casi perfecta y con una superficie extremadamente lisa (Reynoso-de la Cruz, *et al*., 2024).

Estas microgotas levitadas no solo son estables, sino que funcionan como excelentes trampas de luz. Al estar compuestas de agua mezclada con el colorante Rodamina B (RhB) y rodeadas de aire, la diferencia entre las propiedades ópticas de ambos materiales permite que ocurra la reflexión total interna (RTI) (Pedrotti*, et al.,* 2017). Este es un fenómeno óptico simple donde la luz, al incidir en la frontera entre el agua y el aire desde cierto ángulo, no puede escapar y se refleja por completo hacia el interior. Para nuestro caso particular, cuando iluminamos la gota de forma continua con un láser verde de 532 nm, esta reflexión hace que la luz rebote repetidamente en las paredes internas de la esfera sin poder escapar. A un nivel más complejo, cuando estos rebotes continuos interactúan y se acoplan perfectamente con la geometría esférica de la gota, el fenómeno evoluciona hacia lo que la física conoce como modos de Galería Susurrante (WGM).

Este trabajo se enfoca en la caracterización de microcavidades florescentes levitadas por técnicas de videomicroscopía, las cuales además son contrastadas con simulaciones de trazado de rayos basados en la ley de refracción dentro de la microcavidad levitada.

ISSN 2395-9797

La trampa acústica: El levitador TinyLev

Para lograr sostener un objeto en el aire sin tocarlo, este trabajo implementa un dispositivo de levitación acústica de bajo costo e impreso en 3D llamado TinyLev (Reynoso-de la Cruz, *et al.,* 2024). El sistema utiliza 36 pequeños transductores ultrasónicos, distribuidos simétricamente en dos soportes curvos encontrados, que emiten ondas de sonido inaudible a una frecuencia de 40 kHz. Cuando las ondas sonoras viajan en direcciones opuestas, interactúan formando una onda estacionaria con puntos invisibles llamados nodos de presión, donde la fuerza del sonido empuja en todas direcciones y contrarresta la gravedad. Al inyectar una microgota de agua con colorante justo en uno de estos nodos, la gota queda atrapada flotando en el aire, y al no tocar ninguna superficie, la tensión superficial la moldea de forma natural hasta convertirla en una esfera casi perfecta.

Esta trampa acústica es controlada por un Arduino nano y componentes electrónicos los cuales en conjunto con la alimentación de los transductores consumen 900mW de potencia. Este diseño ofrece una estabilidad asombrosa al mantener la microgota fija, con un registro de variación en su posición del orden de $\pm 25\ \mu m$ (Reynoso-de la Cruz, *et al.,* 2024). Esto proporciona el escenario perfecto para iluminar la gota de forma continua con un láser y estudiar visualmente cómo la luz se queda atrapada en su interior. Como referencia, la Figura 1 muestra una fotografía del esquema experimental donde se visualizan detalladamente todos los componentes de la trampa acústica y todo el equipo de caracterización.

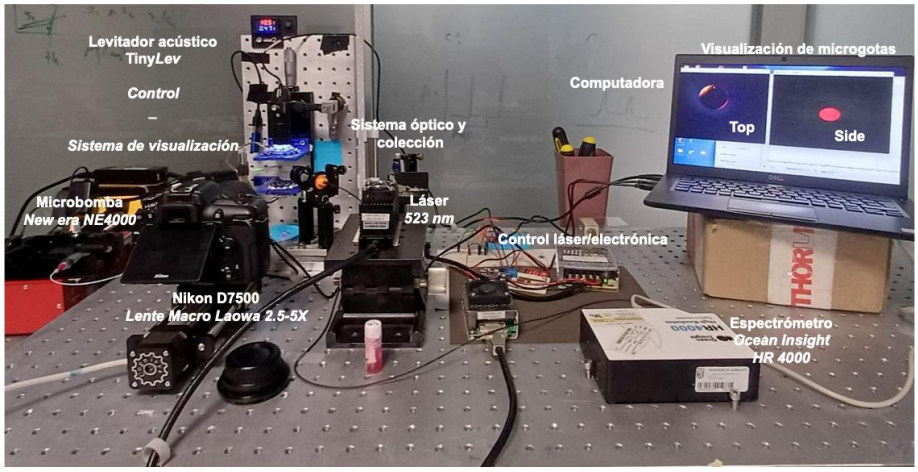

Figura 1. *Fotografía del arreglo experimental donde se observa el levitador acústico, las cámaras de visualización, la microbomba de inyección, el módulo de control, la fuente de poder, el sistema de excitación láser y el analizador de espectros portátil.*

La Figura 1 muestra el levitador TinyLev, el sistema de monitoreo de las gotas levitadas, el cual consta de dos cámaras tipo USB-microscope (top y side) y una cámara side profesional (NIKON D7500) que permite capturar detalles de la trayectoria de la luz propagándose dentro de la microgota ya que cuenta con un objetivo ultra macro Laowa de 25 mm para capturas de alta resolución. El arreglo muestra también una bomba de inyección de fluidos New era serie NE-4000 (microbomba). La microbomba de jeringa inyecta un volumen inicial de 10 µl de solución de agua con RhB en el nodo central del levitador, proceso que es monitoreado por las dos cámaras de microscopio USB. El sistema de excitación óptica emplea un láser continuo con una longitud de onda de trabajo centrada en 532 nm (Civil Laser), cuyo haz es dirigido por un espejo para iluminar la microgota. Finalmente, la emisión óptica de la cavidad levitada se capta a través del sistema de visión descrito arriba y, además, un analizador de espectros óptico (Ocean Insight HR 4000). Este sistema requiere componentes ópticas y filtros de color que colectan y guían la luz colectada por una lente, a través de una fibra óptica hacia el un espectrómetro.

Resultados

Al excitar ópticamente la gota, las moléculas de RhB fluorescen. Esta luz queda atrapada en el interior debido a la condición de RTI, la cual, obliga a la luz a reflejarse continuamente y a circular a lo largo de la superficie perimetral de la gota y dentro de esta (ver Figura 2).

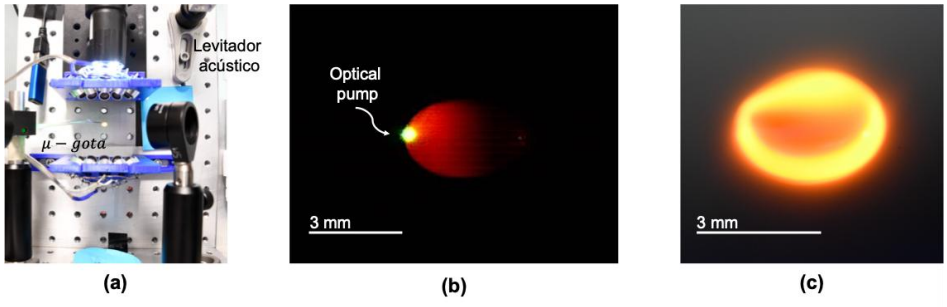

Figura 2. Acercamiento al sistema acústico TinyLev (a). Fotografías, μ-gota levitada e imágenes (b) side y (c) fotografía macro de la microgota, compuesta de agua con RhB, fluoresciendo al ser excitada ópticamente. (c) Imagen tomada con la cámara Nikon de alta resolución.

La Figura 2, muestra de izquierda a derecha, un acercamiento de la pinza acústica y la microgota fluorescente atrapada en la misma. Una imagen de la microgota y el haz láser impactando en la misma. Finalmente, la Figura 2 (c) muestra a la microgota fluoresciendo y sosteniendo esta luz, emitida desde su interior, en forma de anillo dentro de la microcavidad, fenómeno conocido como modo de galería de susurro (WGM, por sus siglas en inglés) (Barajas-Sánchez, *et al.*, 2025; Reynoso-de la Cruz, *et al*., 2024; Shen, *et al.,* 2018).

El procesamiento digital de las imágenes (Figura 3) nos permite estudiar la microgota desde las diferentes perspectivas de la Figura 2. Con este análisis, podemos rastrear las trayectorias de la luz atrapada en su interior e identificar el brillo intenso en los bordes, el cual delata la amplificación de luz por resonancia (los ya mencionados modos de galería susurrante). Además, al procesar digitalmente las imágenes para aumentar el contraste, logramos evaluar con precisión cómo se distribuye la emisión dentro de la gota.

Obtención de trayectorias (Procesamiento digital de imágenes)

Las trayectorias de la luz dentro de la microgota levitada fueron obtenidas utilizando procesamiento digital de imágenes (PDI) (Álvarez-Martínez, *et al.,* 2022). Para ello, las imágenes obtenidas (por ejemplo Fig. 2 (c)) se sometieron al siguiente protocolo:

1. Selección del espacio de color, que para este caso particular fue el color rojo.
2. Transformación de espacio de color a escala de grises.
3. Umbralización para zonas de baja (U1) y alta (U2) intensidad de luz, generando dos imágenes diferentes, y finalmente,
4. La suma matricial de las imágenes obtenidas en la umbralización, identificando trayectorias.

La Figura 3 muestra, en un diagrama de bloques, el procedimiento seguido para el PDI desde la selección de la región de color de interés hasta la umbralización y resultado de suma matricial.

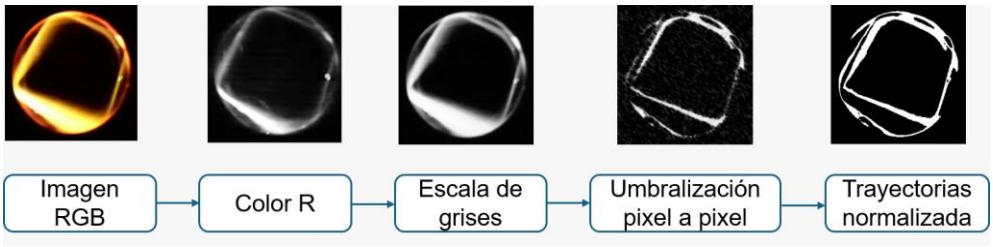

Figura 3. Metodología de PDI para la identificación de trayectorias de luz en la microgota levitada. Se detalla el proceso desde el aislamiento del canal de color de interés hasta la obtención del resultado mediante suma matricial.

Teoría y resultados experimentales

Ley de Snell y Reflexión total interna

Para comprender cómo la luz se confina y traza trayectorias internas mediante múltiples reflexiones dentro de la microgota, es necesario recurrir a la Ley de Snell de la refracción (Pedrotti *et al.,* 2017). Esta ley describe el origen de la Reflexión Total Interna (RTI) al relacionar los ángulos de incidencia (medio 1) y de transmisión (medio 2) con el índice de refracción (n), una propiedad óptica fundamental de cada medio, mediante la siguiente expresión:

$$n_1 sen\,\theta_1 = n_2 sen\,\theta_2$$

La ecuación pasada se conoce como ecuación de Snell o Ley de Snell. En esta, n_1 y n_2 son respectivamente, los índices de refracción de ambos medios, que para nuestro caso especial serán agua n_1 y aire n_2. Hemos considerado que agua fuese nuestro medio n_1 ya que suponemos que la luz ya esta dentro de la microgota, y al viajar dentro de la misma, se topará con una interfaz, un cambio de medio, en este caso aire n_2. La Figura 3 muestra este principio de forma general y un bosquejo de una microgota con RTI.

Esta expresión, llamada Ley de Snell, utiliza los índices de refracción n_1 y n_2 para medir qué tanto se desvía la luz al cambiar de medio. En nuestro experimento, ya presente en la microgota, viaja hacia el aire (exterior). Al llegar a la frontera (la interfaz agua-aire), la luz experimenta un cambio drástico. Este viaje se ilustra en los diferentes esquemas de la Figura 4, donde el esquema (a) nos sirve de guía para entender el sistema completo, los valores n_1 y n_2 y los ejes de referencia (la superficie y la línea normal).

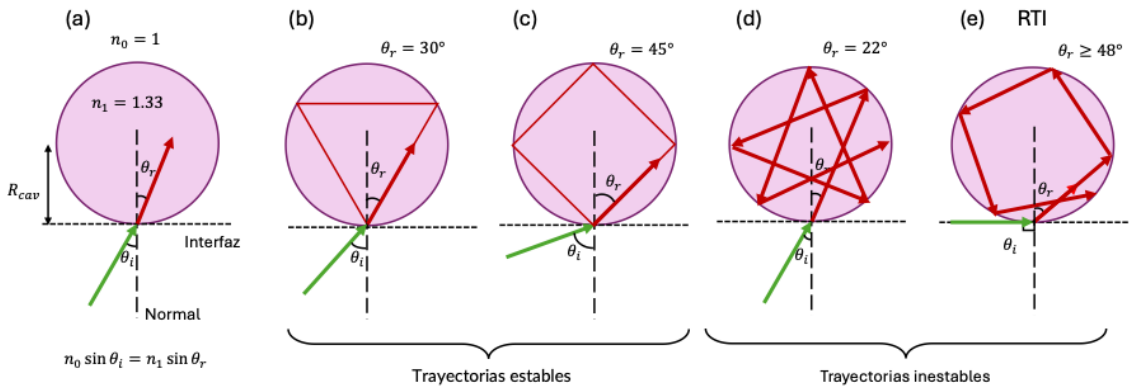

Figura 4. Refracción de un haz de luz al interactuar con una esfera con índice de refracción n_1. (a) Modelo físico para las simulaciones de refracción. (b) y (c) presentan trayectorias estables que se cierran en sí mismas. (d) y (e) son trayectorias inestables. (e) Presenta el caso de reflexión total interna (RTI).

Si el haz de luz choca con una inclinación pequeña, logra escapar desviándose en la superficie. Sin embargo, al aumentar la inclinación hasta el llamado ángulo crítico θ_c , la luz ya no puede salir y se ve obligada a viajar rozando la frontera. Al superar este límite, la superficie deja de ser transparente y actúa como un espejo perfecto: la luz rebota hacia el interior y queda completamente.

Los casos (b) y (c) de la Figura 4, son ejemplos que muestran fenómenos fascinantes en donde la luz queda atrapada de forma tan estable que dibuja polígonos perfectos, por ejemplo, un triángulo y un cuadrado, al cerrarse sobre sus mismas trayectorias. Por el contrario, los esquemas (d) y (e) muestran caminos caóticos que forman figuras irregulares. En el caso (e), además, se aprecia el fenómeno de RTI, donde la superficie de la gota actúa como un espejo perfecto y no deja escapar ni un solo haz de luz.

Dado que, en el límite de $\theta_2 = 90°$, tenemos que $\theta_1 = \theta_c$, de esto la ley de Snell resulta en que

$$\theta_c = sen^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Suponiendo un índice de refracción de la microgota a base de agua de $n_1 \approx 1.33$, levitada en aire $n_1 \approx 1$, resulta en $\theta_c \approx 48^{\circ}$. Lo que indica que, internamente, cualquier haz de luz que impacte la superficie curva de la gota (interfaz agua-aire) con un ángulo superior a 49° quedará atrapada dentro por el fenómeno de RTI, ver Figura 5.

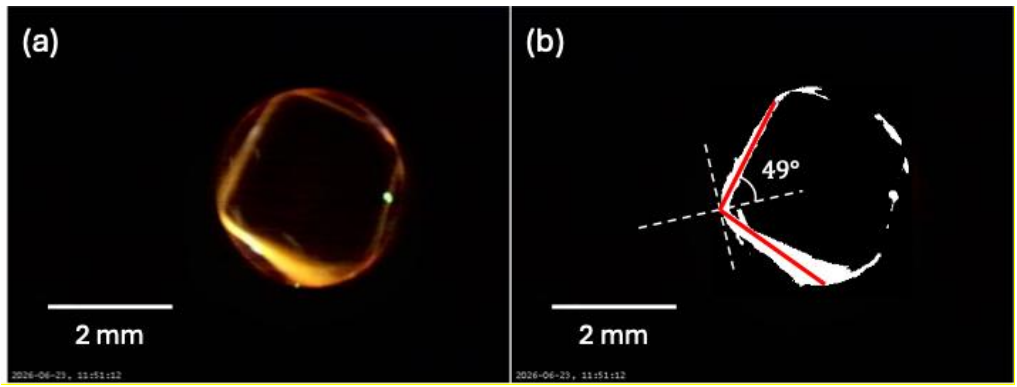

Figura 5. Top view de una microgota levitada representando el fenómeno de RTI. La inclinación del haz supera el límite necesario para que la superficie actúe como un espejo perfecto y retenga la luz a partir de RTI. La imagen de la derecha muestra los detalles resaltados tanto de la microgota como la trayectoria de la luz, una vez que aplicamos PDI a la imagen original.

La interacción de la luz con estas microgotas levitadas da lugar a fascinantes mecanismos de soporte y guiado de luz a través de tres mecanismos diferentes, Figura 6. El primero de ellos es el fenómeno tipo Fabry-Pérot (Pedrotti *et al.,* 2017), el cual ocurre cuando un haz de luz cruza la gota en línea recta y comienza a rebotar de un lado a otro, como si estuviera atrapado entre dos espejos, formados por la interfaz entre los materiales agua-aire; si el tamaño de la onda, o una fracción de esta, coincide exactamente con el diámetro de la gota, la luz se sincroniza en cada rebote, acumulando energía hasta volverse increíblemente intensa, mientras que aquellos colores que no encajan a la perfección terminan cancelándose.

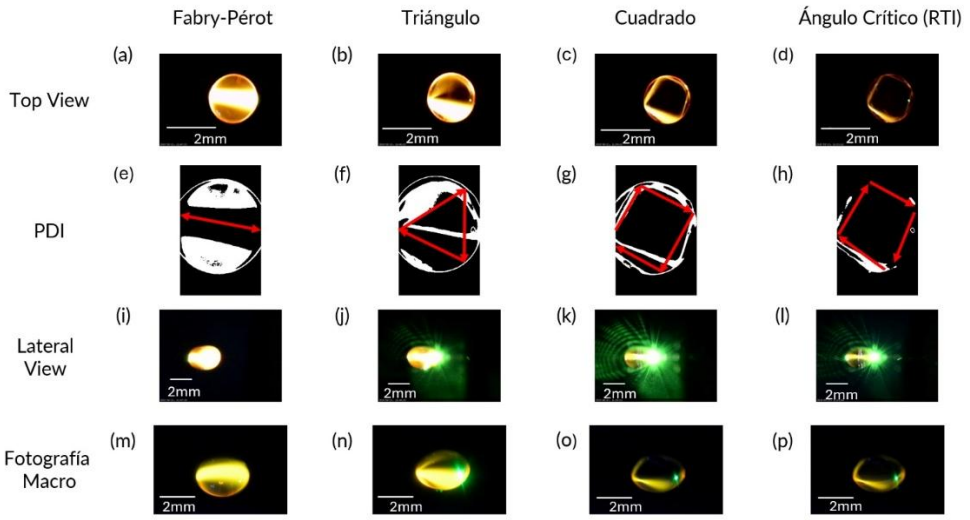

Figura 6. Mecanismos de guiado de luz en microgotas levitadas. Se muestran desde el fenómeno tipo Fabry-Pérot hasta trayectorias estables y WGM resonando dentro de la microgota. También se presentan los procesos de PDI y la caracterización experimental a través de las cámaras.

El segundo y más eficiente mecanismo son los WGM; aquí la luz no cruza el centro de la gota, sino que viaja pegada a su contorno (periferia) y esférico dando vueltas en círculos de manera continua, imitando el famoso efecto acústico de las cúpulas de algunas catedrales donde un susurro viaja por las paredes curvas y se escucha con total claridad al otro lado. Finalmente, el tercer mecanismo involucra trayectorias regulares e irregulares, un comportamiento más caótico donde la luz y su viaje dentro de la microgota, se basa exclusivamente en la geometría flexible de la misma para seguir caminos complejos antes de escapar. El resultado visual de estas interacciones se puede apreciar a detalle en la Figura 6, la cual muestra los mapas de intensidad de la luz y el PDI. Para capturar este espectáculo microscópico en tiempo real, el arreglo experimental cuenta con un sistema de cámaras comerciales tipo USB que supervisan el proceso desde una vista superior y lateral, complementado con una cámara profesional Nikon y un lente macro que registran con absoluta nitidez cómo la luz es gobernada en un espacio tan diminuto.

Finalmente, las características del espectro de emisión de nuestro sistema —basadas en el fenómeno de fluorescencia obtenido al excitar ópticamente la microgota con RhB como colorante, se muestran en la Figura 7. Esta emisión es recolectada por un arreglo óptico y registrada de forma simultánea por un espectrómetro portátil y por nuestro sistema de cámaras. El análisis visual se ejecuta mediante un protocolo de Procesamiento Digital de Imágenes (PDI) estructurado en los siguientes pasos:

- Transformación del espacio de color: Conversión lineal del modelo RGB (Red, Green, Blue) de cada imagen capturada al espacio HSV (Hue, Saturation, Value) para generar una matriz de píxeles equivalente.
- Clasificación espacial: Segmentación de cada píxel de la imagen de acuerdo con sus coordenadas y posición dentro del espacio HSV.
- Calibración cromática: Vinculación de la posición angular de cada píxel en el círculo cromático con una longitud de onda específica.

Esta conversión permite asociar cada tonalidad e intensidad con un ángulo determinado dentro del círculo cromático, mientras que la saturación se mide porcentualmente desde el centro hacia el perímetro de este. De este modo, se cuantifica y acumula el número de píxeles en cada posición angular; esta sumatoria se grafica posteriormente como intensidad espectral en función de la longitud de onda, dando origen a un pseudoespectro.

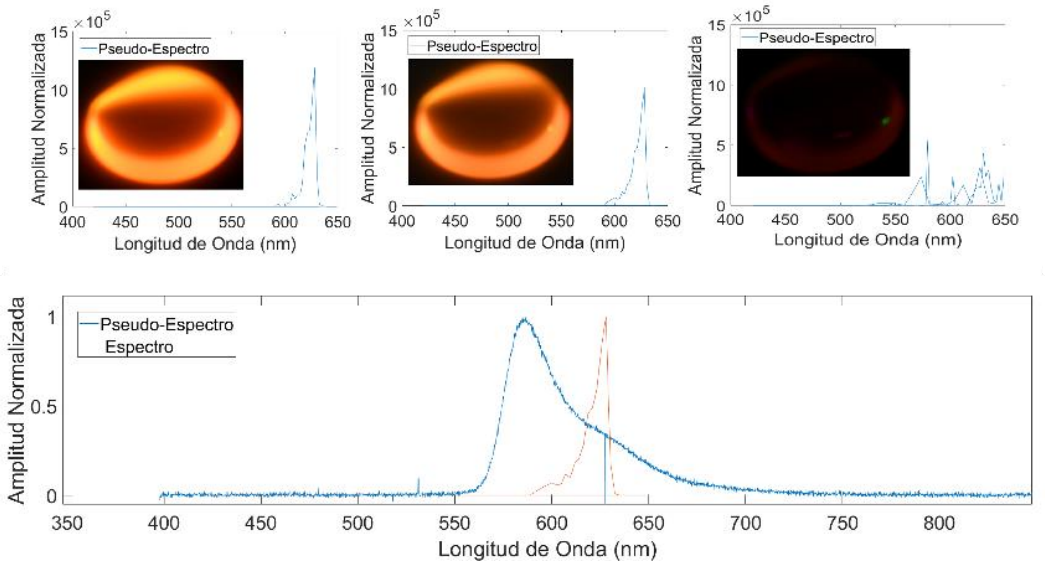

Figura 7. Comparación del espectro de emisión de la microgota. Los paneles superiores muestran las imágenes capturadas y sus respectivos pseudoespectros calculados por PDI. El panel inferior compara el pseudoespectro reconstruido digitalmente (azul) frente al espectro real medido por el espectrómetro (naranja).

A pesar de que ambos espectros se traslapan, existen diferencias notorias entre las posiciones de los picos máximos y la forma de registro del espectro. Esta discrepancia se atribuye, en primer lugar, a la limitación física de los filtros integrados en las cámaras convencionales, cuyas bandas de sensibilidad espectral (RGB) son inherentemente anchas y se traslapan, perdiendo la resolución nanométrica con la que cuenta el espectrómetro. En segundo lugar, la elevada intensidad lumínica del anillo de la microgota posiblemente provoca una saturación en el canal rojo del sensor, activando parcialmente el canal verde y haciendo que el sistema registre tonalidades amarillas o anaranjadas. Al aplicar el protocolo de PDI en el espacio HSV, este viraje cromático se traduce erróneamente en ángulos asociados a longitudes de onda menores, lo que genera el ensanchamiento artificial y el desplazamiento del pico observado en la reconstrucción digital.

Conclusiones

En conclusión, este trabajo demuestra con éxito que el uso de la levitación acústica, mediante el dispositivo TinyLev, representa una alternativa viable y accesible para el desarrollo de cavidades ópticas flotantes y estables. Al ser dopadas con RhB y excitadas ópticamente con un láser de 532 nm, las microgotas emiten luz fluorescente que se confinan de forma eficiente gracias a la reflexión total interna y a los modos de galería susurrante Asimismo, la implementación de video microscopía y el procesamiento digital de imágenes permitieron rastrear con precisión las trayectorias de los haces de luz y aproximar su comportamiento espectral al comparar entre el resuelto con un analizador de espectros ópticos de alta resolución y el capturado por nuestras cámaras presentes en el arreglo experimental. Finalmente, los patrones visuales y trayectorias observadas mostraron un excelente empate con el trazado de rayos teóricos fundamentado en la ley de refracción óptica.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a la Lic. en Física Rosario Saraí Urdiales Mena por apoyarnos con el montaje del levitador acústico. A los proyectos CIIC 2026-138, CBF-2025-I-2568 y XXXI Verano de la Ciencia UG. Finalmente, un agradecimiento especial al Departamento de Ingeniería Física y la Dirección de la División de Ciencias e Ingenierías por el apoyo proporcionado para contar con el espacio físico para el laboratorio de Microfotónica. La estudiante Sofía Czestochowa Águila Heredia agradece a la beca Veranos de la Ciencia

UG, XXXI edición por hacer posible su participación en el proyecto. Uriel Alessandro Barajas Sánchez (CVU 1264855) agradece a la SECIHITI por la asignación de una Beca Nacional para estudios de Posgrado para su doctorado mediante la convocatoria 2026-1. Jonathan Ulises Álvarez Martínez (CVU 886439), agradece a la SECIHTI-Convocatoria 2025 Estancias Posdoctorales Por México.

Referencias

Álvarez-Martínez, J. U., Medina-Cázares, O. M., Soto-Alcaraz, M. E., Castañeda-Priego, R., Ramos-Ortiz, G., Gutiérrez-Juárez, G., & Castro-Beltrán, R. (2022). Microfluidic system manufacturing by direct laser writing for the generation and characterization of microdroplets. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 32(6), 065001. https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac628d

Barajas-Sánchez, U. A., Ortiz-Ricardo, E., Padierna, L. C., Reynoso-de la Cruz, H. M., González-Vega, A., Rosas-Román, I., Ramos-Ortiz, G., Gutiérrez-Juárez, G. G., Vázquez, G. V., & Castro-Beltrán, R. (2025). Cylindrical microlasers: Emission research and machine learning-assisted analysis between ASE and lasing phenomena. *Journal of Physics: Photonics*, 7, 045017. https://doi.org/10.1088/2515-7647/ae011f

Chen, D., Kovach, A., Shen, X., Poust, S., & Armani, A. M. (2017). On-chip ultra-high-Q silicon oxynitride optical resonators. *Acs Photonics*, 4(9), 2376-2381. https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00752

Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2017). Introduction to optics (3rd ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781108552493

Reynoso-de la Cruz, H. M., Hernández-Campos, E. D., Ortiz-Ricardo, E., Martínez-Borquez, A., Rosas-Román, I., Contreras, V., Ramos-Ortiz, G., Mendoza-Santoyo, B., Zurita-Lopez, C. I., & Castro-Beltrán, R. (2024). Acoustically levitated whispering-gallery mode microlasers. *Optics & Laser Technology*, 171, 110352. https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110352

Shen, X., Beltran, R. C., Diep, V. M., Soltani, S., & Armani, A. M. (2018). Low-threshold parametric oscillation in organically modified microcavities. *Science Advances*, 4(4), eaao4507. https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4507