

Fotoacústica: estudiar la materia escuchando la luz

Ing. Francisco Javier Castillo Romero

Instituto Tecnológico de Orizaba

Dr. Jose de Jesus Agustin Flores Cuautle

Secihti-Instituto Tecnológico de Orizaba

Dr. Oscar Osvaldo Sandoval Gonzalez

Instituto Tecnológico de Orizaba

***Dra. Gemima Lara Hernández**

Instituto Tecnológico de Orizaba.

larag_139@hotmail.com



Resumen

El efecto fotoacústico ocurre cuando la luz es absorbida por un material y provoca pequeños cambios de temperatura y vibraciones que se transforman en sonido detectable mediante sensores. Este fenómeno, descubierto en el siglo XIX, ha cobrado gran relevancia gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que permiten aprovecharlo en distintos campos. En este artículo se explica de manera sencilla cómo se origina el efecto fotoacústico y se muestran ejemplos de sus aplicaciones en áreas tan diversas como la medicina, donde se utiliza para obtener imágenes no invasivas de tejidos, la agricultura, para mejorar la calidad de los cultivos y alimentos, o el medio ambiente, al facilitar la detección de contaminantes en el aire y el agua. Más allá del interés científico, la fotoacústica representa una herramienta prometedora con beneficios directos para la salud, la industria y el cuidado del entorno.

Introducción

En física, el estudio del calor y del sonido suele considerarse como áreas separadas. Sin embargo, existe una zona de convergencia entre ambas, especialmente cuando

la luz es absorbida por un material y produce calor y vibraciones. Este fenómeno ha generado interés en distintas disciplinas.

En particular, el efecto fotoacústico se refiere a la generación de ondas sonoras como consecuencia de la absorción de luz. Este fenómeno fue reportado por primera vez por Alexander Graham Bell alrededor de 1880, aunque en ese entonces se consideró una curiosidad científica. Hoy en día, gracias al desarrollo de nuevos instrumentos de medición y al avance en el procesamiento de datos, su estudio ha resurgido, encontrando aplicaciones en diversos campos (Figura 1).

En el ámbito de la salud, esta técnica resulta especialmente valiosa porque permite obtener información útil para el diagnóstico médico sin dañar las muestras analizadas; es decir, es una técnica no invasiva. Este trabajo recorre algunas de las áreas en las cuales la fotoacústica ha generado resultados de interés tanto para la comunidad científica como para el público en general.

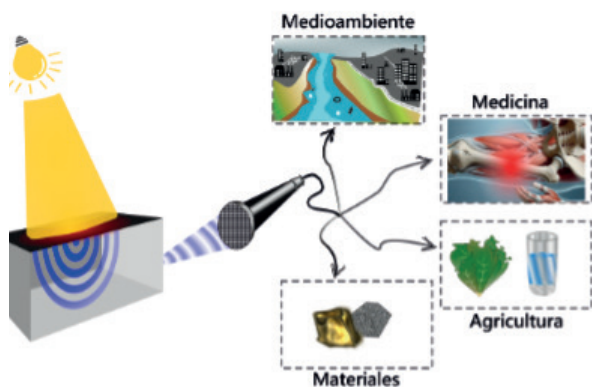


Figura 1. Algunas áreas de estudio del efecto fotoacústico.

Desarrollo

La luz puede definirse como una forma de energía visible que se propaga en forma de ondas, conocidas como radiación electromagnética. Cuando la luz incide sobre un material, su energía puede ser absorbida, generando distintos efectos, como el efecto fototérmico o el efecto fotoacústico [1].

El efecto fototérmico consiste en el aumento de temperatura de un material al absorber luz. Por su parte, el efecto fotoacústico se refiere a la expansión y contracción del material como consecuencia de dicha absorción, lo que produce ondas de presión que se manifiestan como sonido [2, 3]. Estas ondas sonoras pueden ser detectadas mediante sensores acústicos,

como micrófonos o materiales piezoeléctricos (materiales que generan voltaje al ser comprimidos). Al conjunto de técnicas que estudian estos fenómenos se le conoce como técnicas fotoacústicas. La Figura 2 muestra una representación de los diferentes fenómenos asociados con la interacción de la luz con la materia.



Figura 2. Efectos físicos de la interacción de la luz con la materia.

A través de estas técnicas es posible estudiar el coeficiente de absorción óptico, que indica cuánta luz absorbe un material en función de sus propiedades y del color (longitud de onda) de la luz empleada [1]. Es importante destacar que las ondas generadas por el efecto fotoacústico dependen en gran medida tanto del color de la luz como de este coeficiente.

Además, como la absorción de luz también genera calor, es posible investigar las propiedades térmicas de los materiales, es decir, cómo se comporta el calor en su interior.

Una configuración común en estos estudios es la celda fotoacústica abierta, que consiste en un micrófono sobre el cual se coloca la muestra, mientras se ilumina desde el lado opuesto. Esta configuración permite medir la difusividad térmica, que describe la velocidad a la que un cambio de temperatura en un punto del material se transmite a otro. Esta propiedad puede determinarse en materiales transparentes (que permiten el paso de la luz) y opacos (que no lo permiten).

A continuación, se describen algunas de las áreas en las que se ha utilizado con éxito esta técnica.

Aplicaciones en los materiales

En el estudio de materiales, la técnica fotoacústica (PA, por sus siglas en inglés) se utiliza para analizar propiedades ópticas, es decir, cómo se comporta la luz al interactuar con diferentes sustancias. Específicamente, permite caracterizar el espectro de absorción fotoacústico y estimar de manera cualitativa el coeficiente de absorción óptico. También se pueden investigar las propiedades térmicas y mecánicas de materiales como polímeros, semiconductores y tejidos biológicos [4].

Una aplicación destacada es la detección de defectos internos en materiales. Por ejemplo, Setiawan y colaboradores reportaron la identificación de imperfecciones en láminas de aluminio de 300 micras de espesor, a profundidades entre 215 y 254 micras [5]. Para ponerlo en contexto, un cabello humano tiene un grosor aproximado de 100 micras.

Asimismo, esta técnica se ha utilizado para medir la dureza de metales y el espesor de capas de pintura, lo cual es valioso en el control de calidad industrial. En industrias como la aeronáutica, el grosor de la pintura es crucial tanto por la cantidad utilizada como por el peso añadido. Investigadores griegos han reportado mediciones en capas de 50, 100 y 200 micras [6]; nótese que muchas marcas de papel aluminio tienen un grosor de 50 micras.

Impacto ambiental

La técnica fotoacústica también se ha empleado para medir la concentración de gases, algo especialmente útil en el monitoreo ambiental. Por ejemplo, Rück y colaboradores reportaron la detección de dióxido de nitrógeno (NO_2) en concentraciones de 20 partes por millón (ppm) [7], un gas corrosivo que puede encontrarse en la atmósfera como resultado de actividades humanas. También se ha detectado dióxido de carbono (CO_2) a concentraciones de 2500 ppm y monóxido de carbono (CO) hasta en 70 ppm [8].

En el agua, el fenómeno fotoacústico ha permitido detectar contaminantes como el paracetamol, microplásticos de PET (polietileno tereftalato) y algas. Grzegorzcyk y su equipo evaluaron la sensibilidad de esta técnica para el monitoreo de estas sustancias [9].

Usos en la agricultura

El sector alimentario también se ha beneficiado de la fotoacústica. Diversas bebidas, vegetales, granos, frutas y alimentos procesados han sido estudiados con esta técnica. Por ejemplo, Bicanic analizó el espectro de absorción en granos de maíz y café para evaluar su calidad [10]. Estudios adicionales han demostrado que es posible distinguir entre café orgánico y convencional utilizando espectroscopía fotoacústica en el infrarrojo [11, 12].

Los carotenoides, pigmentos que dan color a frutas y verduras, han sido estudiados en productos como leche y leche en polvo, así como en vegetales como espinaca, lechuga, rábano y chiles, utilizando espectros fotoacústicos [13, 14].

Además, Lara y colaboradores midieron las propiedades térmicas del maíz con el objetivo de mejorar los procesos industriales a gran escala [15].

Otro uso importante es la detección de residuos agrícolas como pesticidas. Lv y su equipo detectaron el fungicida tricyclazole en hojas de arroz [16], mientras que Baptista estudió residuos de amonio en cultivos brasileños [17]. Gordillo, por su parte, utilizó la técnica fotoacústica para determinar la dosis óptima de fertilizantes en maíz midiendo la fotosíntesis en hojas tratadas con diferentes concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio [18].

Algunas aplicaciones médicas

Uno de los campos donde la técnica fotoacústica ha tenido mayor impacto es la medicina, gracias a que los diferentes órganos, tejidos y fluidos corporales tienen coeficientes de absorción óptica distintos dependiendo de la longitud de onda de la luz utilizada [19, 20].

La hemoglobina, proteína que transporta oxígeno en la sangre, presenta comportamientos distintos dependiendo de si está oxigenada o no. La hemoglobina oxigenada absorbe más luz infrarroja, mientras que la desoxigenada absorbe más luz roja [21]. Este principio se emplea en los oxímetros para medir la oxigenación de la sangre y, cuando se combina con técnicas fotoacústicas, permite obtener imágenes (Figura 3) que distinguen arterias (sangre oxigenada) de venas (sangre desoxigenada).

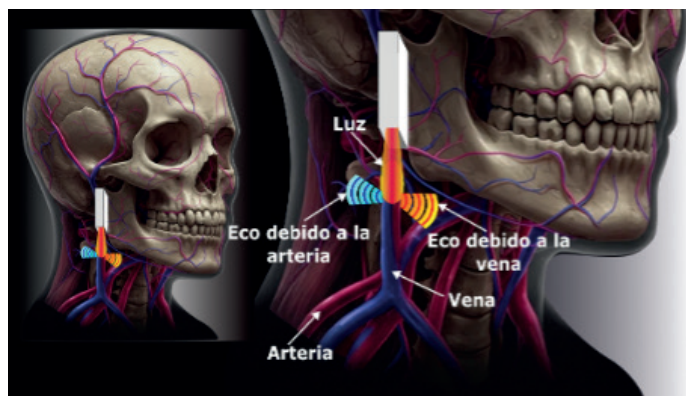


Figura 3. Esquema conceptual que ilustra cómo la diferencia en el coeficiente de absorción entre venas y arterias permite diferenciar entre ambas estructuras.

Cuando la fotoacústica se combina con técnicas de imagen por ultrasonido, se obtiene una modalidad llamada imagenología funcional [22], que genera imágenes enriquecidas con información sobre el consumo de oxígeno en los tejidos. Esto es particularmente útil en el diagnóstico de enfermedades vasculares y otras patologías [23].

Además, como los tumores desarrollan nuevas redes vasculares para alimentarse, la fotoacústica puede detectar estas estructuras en etapas tempranas. Esto se ha aprovechado para detectar cáncer de piel, mama, ovario y próstata [21].

Otro avance importante fue logrado por Zhang y su equipo, quienes utilizaron tomografía fotoacústica para obtener imágenes de la dinámica sanguínea en cerebros de ratones, facilitando el estudio del origen de enfermedades neurológicas [24].

Conclusión

Aunque la obtención de imágenes basada en el efecto fotoacústico ha mostrado avances significativos, aún existen retos por superar, como mejorar la resolución, reducir el costo y aumentar la portabilidad de los equipos. Además, las aplicaciones clínicas están limitadas por la profundidad de penetración que se puede alcanzar con esta técnica. Queda también un amplio campo por explorar en el estudio de células, proteínas e interacciones moleculares.

El desarrollo tecnológico —incluyendo mejoras en instrumentación, análisis de datos e integración con inteligencia artificial— ha ampliado las posibili-

dades de la técnica fotoacústica, especialmente en el análisis de espectros de absorción y en la mejora de imágenes médicas, sin dañar las muestras, lo que la hace ideal para su uso en el ámbito de la salud.

Gracias a su capacidad de medir la oxigenación de tejidos humanos, se ha desarrollado la imagenología funcional, en la que el contraste está dado por el nivel de oxígeno absorbido, permitiendo así interpretar la función de los tejidos.

A pesar de los avances, la técnica se aplica principalmente a nivel de laboratorio, por lo que es necesario continuar con la investigación y el desarrollo de equipos portátiles más potentes. Esto abre oportunidades para nuevas generaciones interesadas en esta área. Como se ha mostrado, las técnicas fotoacústicas están más vigentes que nunca y permiten avanzar en el conocimiento de fenómenos esenciales para nuestra vida diaria.

Este trabajo no pretende ser una recopilación exhaustiva de los avances en el área; sabemos que muchas preguntas quedan sin responder. Sin embargo, cada interrogante es una invitación a sumarse a la búsqueda de respuestas.

Referencias

- [1] Rosencwaig, A. y A. Gersho, Theory of the photoacoustic effect with solids. *Journal of Applied Physics*, vol. 47, no. 1, p. 64, 1976, doi: <https://doi.org/10.1063/1.322296>.
- [2] Halliday, D., R. Resnick y J. Walker, *Física*. CEA, 2003.
- [3] Alonso, M. y E. Finn, *Física: Campos y ondas*. Pearson Educación, 1998.
- [4] Krishnaswamy, S., "Photoacoustic Characterization of Materials," en *Springer Handbook of Experimental Solid Mechanics*, W. N. Sharpe (Ed.). Springer US: Boston, MA, 2008, pp. 769–800.
- [5] Setiawan, A., F. Setiaji, D. Nugroho, et al., "Subsurface detection of opaque and solid material defect based on photoacoustic effect," *Journal of Instrumentation*, 2020, vol. 15, no. 04, P04010, doi: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/04/P04010>.
- [6] Tserevelakis, G. J., A. Dal Fovo, K. Melessanaki, et al., "Photoacoustic signal attenuation analysis for the assessment of thin layers thickness in paintings," *Journal of Applied Physics*, 2018, vol. 123, no. 12, art. 123102, doi: <https://doi.org/10.1063/1.5022749>.
- [7] Rück, T., R. Bierl y F.-M. Matysik, "Low-cost photoacoustic NO₂ trace gas monitoring at the pptV-level," *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, vol. 263, pp. 501–509, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2017.06.036>.
- [8] Dong, M., C. Zheng, L. Dong, et al., "Development and measurements of a mid-infrared multi-gas sensor system for CO, CO₂ and CH₄ detection," *Sensors*, 2017, vol. 17, no. 10, p. 2221, doi: <https://doi.org/10.3390/s17102221>.

org/10.3390/s17102221.

- [9] Grzegorzczak, M., S. Pogorzelski y P. Rochowski, "Towards a novel class of photoacoustics-based water contamination sensors," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022, vol. 10, no. 3, p. 107983, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107983>.
- [10] Bicanic, D. D., "On the photoacoustic, photothermal and colorimetric quantification of carotenoids and other phytonutrients in some foods: a review," *Journal of Molecular Structure*, 2011, vol. 993, no. 1–3, pp. 9–14, doi: <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.12.061>.
- [11] Bedoya, A., F. Gordillo-Delgado, D. Zapata-Sarmiento, et al., "Thermal effusivity measurement of conventional and organic coffee oils via photopyroelectric technique," *Food Research International*, 2017, vol. 102, pp. 419–424, doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.09.013>.
- [12] Gordillo-Delgado, F., E. Marín, D. M. Cortés-Hernández, et al., "Discrimination of organic coffee via Fourier transform infrared–photoacoustic spectroscopy," *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2012, vol. 92, no. 11, pp. 2316–2319, doi: <https://doi.org/10.1002/jsfa.5628>.
- [13] N'Soukpoe-Kossi, C. N., R. Martel, S. Hotchandani y R. M. Leblanc, "Kinetic study of Maillard reactions in milk powder by photoacoustic spectroscopy," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988, vol. 36, no. 3, pp. 497–501, doi: <https://doi.org/10.1021/jf000081a023>.
- [14] Hernández-Aguilar, C., E. S. Gil, O. Z. Pérez, et al., "Photoacoustic Spectroscopy in the Optical Characterization of Foodstuff: A Review," *Journal of Spectroscopy*, 2019, vol. 2019, p. 5920948, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/5920948>.
- [15] Lara Hernández, G., C. Hernández Aguilar, I. de Jesús Perea Flores, et al., "Thermal properties of maize seed components," *Cogent Food & Agriculture*, 2023, vol. 9, no. 1, p. 2231681, doi: <https://doi.org/10.1080/23311932.2023.2231681>.
- [16] Lv, G., C. Du, Z. Zhu, et al., "Rapid and Nondestructive Detection of Pesticide Residues by Depth-Profiling Fourier Transform Infrared Photoacoustic Spectroscopy," *ACS Omega*, 2018, vol. 3, no. 3, pp. 3548–3553, doi: <https://doi.org/10.1021/acsomega.8b00339>.
- [17] Baptista-Filho, M., H. G. Riter, M. G. Silva, F. J. Luna y C. G. Werneck, "Ammonia traces detection based on photoacoustic spectroscopy for evaluating ammonia volatilization from natural zeolites at typical crop field temperature," *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, vol. 158, no. 1, pp. 241–245, doi: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2011.06.012>.
- [18] Gordillo-Delgado, F., D. Zapata-Sarmiento y A. Bedoya, "Photoacoustic Technique Applied to the Assessment of the Dosage of a NPK Fertilizer in Maize (*Zea mays* L.)," *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2023, vol. 25, no. 1, pp. 225–238, doi: <https://doi.org/10.52547/jast.25.1.225>.
- [19] Omar, M., J. Aguirre y V. Ntziachristos, "Optoacoustic mesoscopy for biomedicine," *Nature Biomedical Engineering*, 2019, vol. 3, no. 5, pp. 354–370, doi: <https://doi.org/10.1038/s41551-019-0377-4>.
- [20] Xu, M. y L. V. Wang, "Photoacoustic imaging in biomedicine," *Review of Scientific Instruments*, 2006, vol. 77, no. 4, art. 041101, doi: <https://doi.org/10.1063/1.2195024>.
- [21] Lara Hernández, G. y J. J. A. Flores Cuautle, "Photothermal Techniques in Cancer Detection—Photoacoustic Imaging," en *Diagnosis and Treatment of Cancer using Thermal Therapies*, C. J. Trujillo Romero y D.-L. Flores (Eds.). CRC Press, 2023, pp. 184–199.
- [22] Ye, J., J. Xie, H. Zhao, et al., "Quantitative Photoacoustic Diagnosis and Precise Treatment of Inflammation In Vivo Using Activatable Theranostic Nanoprobe," *Advanced Functional Materials*, 2020, vol. 30, no. 38, p. 2001771, doi: <https://doi.org/10.1002/adfm.202001771>.
- [23] Farajollahi, A. y M. Baharvand, "Advancements in photoacoustic imaging for cancer diagnosis and treatment," *International Journal of Pharmaceutics*, 2024, vol. 665, p. 124736, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2024.124736>.
- [24] Zhang, P., L. Li, L. Lin, et al., "High-resolution deep functional imaging of the whole mouse brain by photoacoustic computed tomography in vivo," *Journal of Biophotonics*, 2018, vol. 11, no. 1, art. e201700024, doi: <https://doi.org/10.1002/jbio.201700024>.

