



# Ciencia forense: un enfoque óptico.

## Forensic science: an optical approach

Fecha de presentación: Noviembre 2024.  
Fecha de aceptación: Noviembre 2024.

Edgar Santiago Reyes Reyes.  
CLEU Campus León.

*“Técnicas espectroscópicas”*

### Resumen

En la criminología forense, las técnicas ópticas desempeñan un papel fundamental en el análisis de pruebas, al facilitar la detección, visualización e interpretación de materiales y patrones no visibles a simple vista. Este documento explora algunos de los métodos ópticos más relevantes, como la espectrofotometría, espectroscopia y fluorometría, utilizando radiación Ultravioleta (UV), visible (vis) e infrarroja (IR). Estas técnicas no solo ofrecen un método analítico para la identificación y análisis de muestras, si no también proporcionan datos precisos y detallados, esenciales para las investigaciones judiciales.

### Palabras clave

Ciencia forense, óptica, espectrofotometría, fluorescencia, criminalística.

### Abstract

In forensic criminology, optical techniques play a fundamental role in the analysis of evidence by facilitating the detection, visualization and interpretation of materials and patterns not visible to the naked eye. This paper explores some of the most relevant optical methods, such as spectrophotometry, spectroscopy and fluorometry, using Ultraviolet (UV), visible (vis) and infrared (IR) radiation. These techniques not only offer an analytical method for the identification and analysis of samples, but also provide accurate and detailed data, essential for judicial investigations.

### Keywords

Forensic science, optics, spectrophotometry, fluorescence, criminalistics.

## INTRODUCCIÓN

Desde sus inicios, la ciencia forense ha sido considerada un campo interdisciplinario o una ciencia mixta. Siendo una parte primordial dentro de la criminalística, la ciencia forense ha proporcionado una metodología científica para el estudio y análisis objetivo de muestras vinculadas a actividades criminales y delictivas. Es importante mencionar las principales áreas de la ciencia forense, como la patología, la antropología, la odontología forense y la toxicología, ya que estas disciplinas constituyen pilares fundamentales que ayudan a discernir hechos y a construir una narrativa sólida para esclarecer sucesos, proporcionando pruebas confiables en diversos contextos delictivos.

En este sentido, una de las herramientas más esenciales en cualquier laboratorio forense es el microscopio, permitiendo analizar muestras a una escala micrométrica y cuyo funcionamiento se basa en principios ópticos. Siguiendo este contexto, la óptica, a través de su desarrollo teórico y tecnológico, ha dotado a la ciencia forense de sofisticadas herramientas, que permiten realizar análisis objetivos y detallados, proporcionando pruebas contundentes en investigaciones donde el análisis de muestras puede ser crucial. Técnicas como la espectrofotometría UV-vis, la espectroscopía infrarroja (IR) y la fluorimetría son ampliamente utilizadas en este campo, y forman parte del conjunto de métodos científicos empleados para el análisis forense de evidencias.

Este artículo informativo tiene como objetivo presentar, de manera concreta y breve, los principios en los que se basan las técnicas espectroscópicas y su aplicación en la ciencia forense. En particular, abordaremos la espectroscopía UV-visible, la espectroscopía infrarroja y la espectroscopía molecular como ejemplos representativos, y destacaremos algunas aplicaciones de estas técnicas en un contexto actual.

### Interacción luz materia

A principios del siglo pasado, el físico alemán Albert Einstein propuso una idea revolucionaria que transformaría nuestra comprensión de la luz. Aunque la teoría clásica de ese entonces brindaba una visión casi completa, la teoría cuántica de Einstein introdujo una nueva forma de entender la absorción y reemisión de luz a través de *fonones*, conocidos también como partículas de luz. En nuestra experiencia cotidiana, todos los colores que percibimos se deben a fotones de diferentes energías que inciden en nuestros ojos. Es importante aclarar que la forma técnica de caracterizar los colores es a través de la energía de los fotones o de su longitud de onda, propiedades que determinan el color de la luz.

Con la propuesta de Einstein y el avance tecnológico en los años siguientes, la espectroscopía se consolidó como una de las principales aplicaciones de la teoría cuántica. Esta técnica analítica permite identificar sustancias y moléculas a partir de la absorción y reemisión de luz, basándose en la interacción luz-materia. El principio por el cual identificamos diferentes sustancias mediante la absorción de luz se ilustra en la Figura 1.

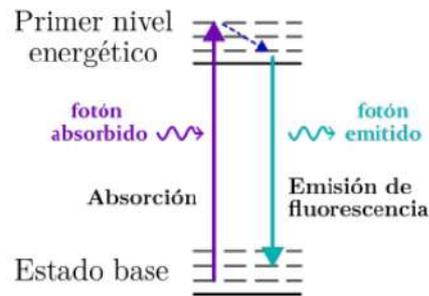


Figura 1. Absorción y emisión de fluorescencia

A nivel atómico, cada molécula posee distintos niveles de energía, donde los electrones suelen encontrarse en el nivel más bajo. Podemos imaginar los niveles de energía como escalones en una escalera molecular. Los electrones pueden *saltar* entre estos escalones al absorber fotones, siempre que la energía transferida sea exacta para realizar estos saltos. A este fenómeno se le denomina *absorción*. Para identificar sustancias mediante absorción, se hace incidir fotones de diferentes energías (o colores) y se observan los fotones ausentes en el espectro, dejando una *huella espectral* de la sustancia.

Otro fenómeno que ocurre cuando una molécula absorbe fotones es la reemisión de la luz absorbida, conocido como *fluorescencia*. En este proceso, la molécula libera el exceso de energía absorbida. Recordemos que los fotones contienen energía, la cual es absorbida por los electrones de una molécula al subir a un nivel energético superior (ver Figura 1). Algunas sustancias liberan el exceso de energía reemitiendo luz de menor energía que la absorbida con diferente color. Esto se observa, por ejemplo, al iluminar una superficie con luz ultravioleta (UV): si hay presencia de semen o saliva en la escena, estas sustancias fluorescen con una luz azul, distinta a la UV.

La absorción y la fluorescencia son mecanismos ópticos fundamentales en diversas áreas científicas, incluida la ciencia forense, ya que permiten la identificación y caracterización de sustancias de interés.

### Técnicas ópticas en ciencia forense

#### Espectrofotometría UV-Vis

La espectrofotometría UV-Vis es una técnica que permite la identificación y estudio de sustancias a través de la absorción de luz en un rango de longitudes de onda que abarca desde la luz UV hasta la luz visible, de ahí su nombre, UV-Vis. Al incidir un amplio rango de longitudes de onda en una muestra, ya sea sólida

o líquida, la muestra absorberá luz en rangos específicos de longitudes de onda si tiene la capacidad de hacerlo. Esto permite identificar y caracterizar una gran variedad de muestras, lo que convierte a la espectrofotometría UV-Vis en una herramienta valiosa en el campo de la ciencia forense.

Un ejemplo de su aplicación en ciencia forense es el estudio de la degradación de la hemoglobina en función de las condiciones ambientales (ver Figura 2), como se observa en el trabajo de Kaur, S. et al (2020). En esta investigación, se analizó la degradación de la hemoglobina con el paso del tiempo, lo cual afecta la eficacia de los análisis de ADN que pueden realizarse en dichas muestras. A través del análisis espectrofotométrico, se concluyó que la calidad del ADN en muestras recuperadas en campo depende en gran medida de las técnicas de preservación empleadas, lo que subraya la importancia de conservar adecuadamente las evidencias en entornos forenses.

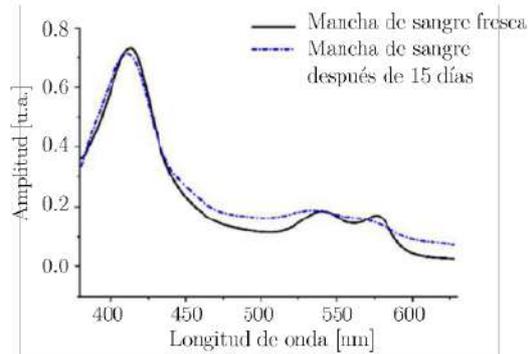


Figura 2. Cambio en la huella espectral entre sangre fresca y sangre de 15 días. Gráfica hecha por Kaur, S. et al (2020)

Otra aplicación reciente se centra en el estudio y desarrollo de materiales económicos y sustentables para su uso en dactiloscopia, como el trabajo publicado por Bueno, D.T. et al. (2024). Tapia propone utilizar polvo de semillas de achiote (bixina), combinado con carbonato de zinc, como material alternativo para el registro de huellas dactilares. Mediante espectrofotometría UV-Vis, comparó la bixina producida por su equipo con bixina comercial, encontrando que es viable elaborar bixina de manera propia sin comprometer la efectividad en su uso forense. Además, realizó pruebas preliminares con bixina y carbonato de zinc como material alternativo para la detección de huellas dactilares, demostrando su potencial como opción económica y sustentable en aplicaciones forenses (ver Figura 3).

Espectroscopia IR

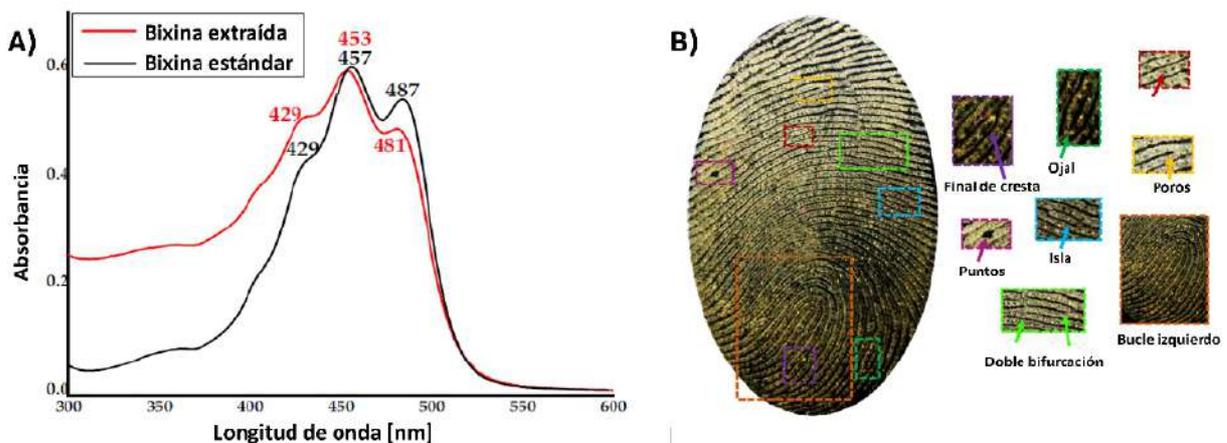


Figura 3. A) Huella espectral de bixina comercial y bixina elaborada por Daniel Tapia et al. B) Análisis de huella dactilar utilizando bixina y carbonato de zinc. Figuras originales por Bueno D.T. et al (2024)

La espectroscopía IR es una técnica que analiza la respuesta de ciertos materiales a la radiación infrarroja. La radiación IR tiene una longitud de onda más larga que la luz UV y visible, por lo tanto, es menos energética. A diferencia de la excitación energética con UV-Vis, que provoca saltos de energía entre niveles atómicos (absorción), la luz infrarroja afecta directamente a los enlaces moleculares, lo cual permite identificar diferentes tipos de materiales y sustancias. Esta capacidad de identificación precisa convierte a la espectroscopía IR en una herramienta invaluable en ciencia forense para el análisis de evidencia biológica.

Un ejemplo reciente de la aplicación de la espectroscopía IR es la identificación del sexo humano a partir del análisis de uñas. Mitu, B. et al. (2023) demostraron que, mediante el análisis de la proteína de queratina en uñas humanas y con el apoyo de inteligencia artificial, es posible identificar el sexo de la persona analizada. En la Figura 4 se muestran las diferencias entre los resultados al analizar uñas femeninas y masculinas. Aunque los espectros son similares, existen pequeñas variaciones que permiten distinguir el sexo. Este avance podría, en el futuro, mejorar la precisión en el análisis de muestras provenientes de diferentes partes del cuerpo en escenas del crimen.

**Fluorometría**

A diferencia de la espectrofotometría UV-Vis y la espectroscopía IR, donde se analiza la luz absorbida por las muestras, la fluorometría se basa en la fluorescencia molecular, que implica la absorción y posterior reemisión de luz. En esta técnica analítica se utiliza comúnmente luz ultravioleta, ya que su alta energía permite que los electrones en las moléculas realicen saltos a niveles de energía superiores. Al regresar a su estado original, las moléculas emiten luz de menor energía (ver Figura 1), lo que resulta útil para la identificación y caracterización de diversos materiales.

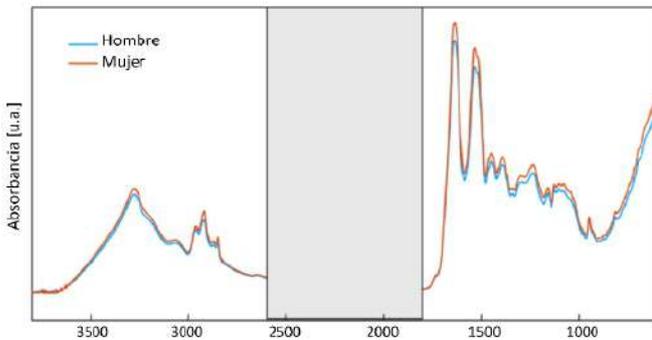


Figura 4. Análisis IR comparando uña masculina y uña femenina. Gráficas hechas por Mitu, B. et al (2023)

Un ejemplo de la utilidad de la fluorometría en la ciencia forense es el estudio realizado por Achetib, N. et al. (2023), el cual muestra las diferencias de emisión de luz por fluorescencia entre fluidos como huellas dactilares, saliva, orina con sangre menstrual, orina, suero y semen. Además, el estudio analizó cómo las señales de fluorescencia cambian en función de la degradación temporal de estos fluidos. En la Figura 5 se muestran las señales de fluorescencia de cada fluido estudiado, donde es evidente la variabilidad entre las emisiones de fluorescencia. Incluso, es posible distinguir a simple vista las diferencias entre la fluorescencia de la orina con restos de sangre y la de la orina sin contaminantes. Estas variaciones permiten la identificación científica de estos fluidos, lo cual es de gran importancia en la ciencia forense.

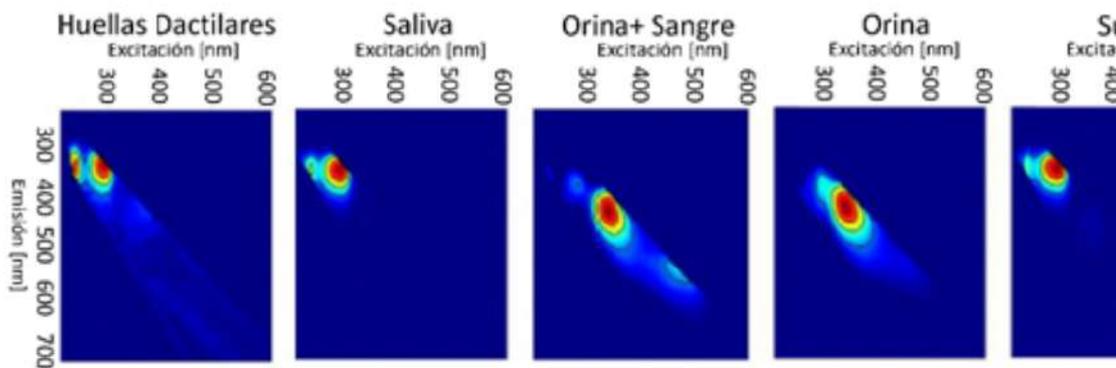


Figura 5. Señales de fluorescencia de huellas dactilares, saliva, orina con sangre menstrual, orina, suero y semen. Es fácil notar las diferencias entre las señales en función del tipo de fluido corporal, lo que permite la identificación objetiva de dichos fluidos. Resultados originales por Achetib, N. et al (2023).

**CONCLUSIONES**

Las contribuciones de la tecnología desarrollada a partir del estudio de la interacción luz-materia han permitido avances significativos en el análisis de una amplia variedad de sustancias mediante técnicas como la espectrofotometría, espectroscopía y fluorescencia. Estas herramientas han encontrado aplicaciones de gran relevancia en la ciencia forense, donde representan un enfoque objetivo, sistemático y analítico para el análisis de muestras y evidencia biológica en escenas criminales.

Si bien las aplicaciones de las técnicas presentadas en este trabajo son vastas en el ámbito forense, es fundamental comprender los principios científicos bases. A medida que la tecnología avanza

rápidamente año con año, es indispensable que los científicos forenses colaboren estrechamente con físicos y químicos para desarrollar métodos cada vez más robustos y precisos, lo que permitirá llevar a cabo investigaciones más sólidas y exactas en el futuro.

## REFERENCIAS

- Achetib, N., Falkena, K., Swayambhu, M., Aalders, M. C. G., & Van Dam, A. (2023). Specific fluorescent signatures for body fluid identification using fluorescence spectroscopy. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30241-7>
- Bueno, D.T., Leitzke, A.F., Crizel, R.L., Jansen-Alves, C., Bertizzolo, E.G., da Silva, J.P., Sejanés, G.Q., Mariotti, K.d.C., de Pereira, C.M.P. (2024) Characterization of Bixin by UV-Visible Spectroscopy and HPLC, and Its Application as Latent Fingermark Developer. *Analytica—A Journal of Analytical Chemistry and Chemical Analysis*, 5, 107-118. <https://doi.org/10.3390/analytica5010007>
- Kaur, S., Saini, V., & Dalal, R. (2019). UV-Visible spectroscopic effect on Haemoglobin & DNA degradation: A forensic approach. *Forensic Science International*, 307, 110078. <https://doi.org/10.1016/j.forciint.2019.110078>
- Mitu, B., Trojan, V., & Halámková, L. (2023). Sex Determination of Human Nails Based on Attenuated Total Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy in Forensic Context. *Sensors*, 23(23), 9412. <https://doi.org/10.3390/s23239412>

