

Análisis espectroscópico de billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica

Spectroscopic analysis of polymer banknotes from the second series of Costa Rica

James Andrés Ruiz-Vásquez¹, Ernesto Montero-Zeledón²

Fecha de recepción: 25 de marzo, 2025

Fecha de aprobación: 18 de julio, 2025

Ruiz-Vásquez, J.A.; Montero-Zeledón, E. Análisis espectroscópico de billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 39 N° 1. Enero-Marzo, 2026. Pág. 116-129.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v39i1.7860>

1 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 jamesandresruizvasquez@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0005-4395-4933>

2 Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica.

 emontero@tec.ac.cr

 <https://orcid.org/0000-0002-4545-5805>



Palabras clave

Análisis comparativo; numismática; espectroscopía; fluorescencia; propiedad física; radiación ultravioleta; seguridad.

Resumen

La falsificación de billetes es un problema persistente en Costa Rica, por lo que garantizar su autenticidad es esencial para la seguridad económica y la confianza en el sistema financiero. Para ello, los billetes incorporan diversas medidas de seguridad, entre las que destacan las marcas fluorescentes, visibles únicamente bajo luz ultravioleta. Este artículo tiene como objetivo estudiar las propiedades espectroscópicas de las marcas de seguridad en los billetes de Costa Rica, como medio para la diferenciación de billetes falsos y auténticos, así como para establecer propiedades útiles en procesos de control de calidad. Para ello, se aplicaron técnicas de espectroscopia infrarroja y de fluorescencia en zonas clave del billete, para la identificación de máximos de excitación, emisión y absorbancia. Los resultados mostraron patrones de emisión fluorescentes similares entre diferentes denominaciones, con variaciones de intensidad en distintas zonas del mismo billete. Además, se identificaron características del sustrato de los billetes concordantes con el material especificado. Este análisis contribuye a mejorar la detección de billetes falsos y los métodos de autenticación, pero también al establecimiento de una línea de investigación pertinente en el ámbito nacional.

Keywords

Comparative analysis; fluorescence; money; physical property; security; spectroscopy; ultraviolet radiation.

Abstract

Counterfeiting of banknotes is a persistent problem in Costa Rica, making it essential to ensure their authenticity for economic security and confidence in the financial system. For this reason, banknotes incorporate various security features, notably fluorescent marks visible only under ultraviolet light. This article aims to study the spectroscopic properties of security marks on Costa Rican banknotes to differentiate counterfeit from authentic banknotes and to establish properties useful for quality control processes. Therefore, fluorescence and infrared spectroscopy techniques were applied to key areas of the banknotes to identify excitation, emission, and absorbance maxima. Results showed similar fluorescent emission patterns across different denominations, although variations in intensity were observed in different areas of the same banknote. Additionally, the identified characteristics of the banknote substrate were consistent with the specified material. This analysis contributes to improving the detection of counterfeit banknotes and authentication methods, as well as to establishing a relevant line of research at the national level.

Introducción

La falsificación de billetes es un delito que se presenta cada vez con mayor frecuencia, buscando imitar las características auténticas de seguridad mediante técnicas cada vez más sofisticadas [1]. Solo en el 2023, el Banco Central de Costa Rica (BCCR) reportó 1682 unidades falsas de todas las denominaciones y series, que equivalen a 18 253 000 colones [2]. Por ende, el reto más grande de la nueva generación de billetes es incrementar la tecnología detrás de las marcas de seguridad como una forma de prevenir la falsificación [3]. Ejemplo de ello es la

incorporación de un nuevo sustrato de polímero en la impresión de la reciente familia de billetes de Costa Rica [4]. Esto redujo los costos de emisión, aumentó la vida útil y disminuyó el riesgo de falsificación [5].

No obstante, los estudios académicos en Costa Rica sobre marcas de seguridad en billetes son nulos o muy escasos. En otros países, las investigaciones se enfocan en caracterizar desde propiedades ópticas, hasta propiedades de sustratos, tintas y pigmentos de los billetes. En un estudio de Ferrero [6], se desarrolla una técnica para la detección automatizada de fibras luminiscentes para la identificación de falsificaciones. En una revisión de Wang [7], se ofrece una mejora de los materiales de las marcas de seguridad en billetes, tales como el desarrollo de sustratos resistentes, tintas de seguridad y materiales con funciones antifalsificación.

Por otra parte, algunas investigaciones han sido enfocadas en el desarrollo de metodologías para la autenticación de billetes mediante características espectroscópicas. En un estudio de Novais [8], se establecen metodologías de caracterización para la comparación de billetes auténticos con falsificaciones, mediante fluorescencia de rayos X y espectroscopía Raman. En una investigación realizada por Mikulicova [9], se caracterizaron pigmentos fluorescentes en billetes de sustrato polimérico de diversos países. En otros estudios académicos de Sonnex [10], Correia [11], Oliveira [12] e Itrić [13], se emplea la espectroscopía infrarroja para la identificación de alteraciones, análisis y evaluación de la autenticidad de los billetes.

El presente artículo tiene como objetivo estudiar las propiedades espectroscópicas de las marcas de seguridad fluorescentes en los billetes de Costa Rica, para la diferenciación de billetes falsos y auténticos, el control de calidad y fomentar el uso de nuevas técnicas para la caracterización y conservación de colecciones. Por ende, se interpretan espectros de emisión, excitación e infrarrojo de las marcas de seguridad fluorescentes presentes en los billetes poliméricos de la segunda serie de Costa Rica, actualmente en circulación. Estos estudios permiten establecer otras características de referencia, con las cuales los examinadores podrían autenticar los elementos de seguridad. Además, da paso a la generación de conocimiento sobre los materiales del sustrato, tintas y dispositivos que permitan mejorar las características de seguridad.

Espectroscopía en billetes

Características de seguridad

El BCCR actualiza periódicamente las series de billetes, mejorando las características técnicas de seguridad. Estas se dividen en dos tipos: las visibles y perceptibles al tacto, y aquellas que requieren instrumentos especializados como lupas, lámparas ultravioletas o visores infrarrojos [14]. En los billetes de Costa Rica se emplean ambos tipos para prevenir la falsificación [4], incluyendo técnicas como la impresión en intaglio, marcas de agua, elementos fluorescentes mediante pigmentos luminiscentes, marcas iridiscentes, dispositivos ópticamente variables (OVD), microimpresiones, bandas magnéticas, pigmentos infrarrojos y otros elementos de seguridad de tercer nivel utilizados únicamente por el Banco Central [15].

Para analizar las marcas de seguridad de segundo nivel son imprescindibles instrumentos especializados como espectrofluorímetros y espectrómetros infrarrojos. De esta forma, es posible medir atributos de las propiedades del sustrato del billete y características de los pigmentos fluorescentes que están presentes en toda la gama de denominaciones.

El espectro electromagnético de la luz

Al conjunto de todas las longitudes de ondas electromagnéticas se le denomina espectro electromagnético [16]. Las ondas electromagnéticas pueden ser clasificadas según su longitud de onda, o de forma equivalente, por su energía y frecuencia. En este contexto es conveniente considerar la radiación electromagnética desde la perspectiva cuántica, donde la radiación se compone de paquetes de energía denominados fotones [17]. Así, la energía de una onda electromagnética también puede ser visualizada como la energía de un fotón mediante la ecuación (1).

$$E = h \nu = \frac{h c}{\lambda} \quad (1)$$

Donde E es la energía del fotón, h es la constante de Planck, ν es la frecuencia de la onda electromagnética, c es la velocidad de la luz y λ es la longitud de la onda electromagnética [17]. Por ende, la energía electromagnética es proporcional al recíproco de la longitud de onda.

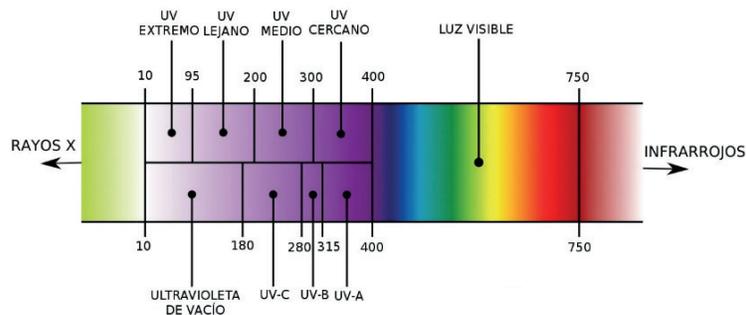


Figura 1. Espectro electromagnético ultravioleta y visible. Fuente: [18]

La región ultravioleta (UV) está definida en el rango de 10 nm a 400 nm aproximadamente, como se observa en la *Figura 1*. Esta radiación se origina en las capas externas de la nube electrónica de los átomos, principalmente cuando se dan saltos energéticos entre sus estados [16]. La luz visible está comprendida en el rango de 400 nm a 750 nm aproximadamente, y se produce generalmente por una reorganización de los electrones externos en átomos y moléculas. El ser humano percibe esta región del espectro en forma de colores debido a una respuesta fisiológica y psicológica [16]. Por su parte, la región infrarroja del espectro electromagnético es la menos energética de la región UV-VIS-IR, la cual tiene su origen en las vibraciones y rotaciones moleculares [16].

Luminiscencia

La luminiscencia es la emisión de radiación visible por un átomo o molécula en el momento de una transición electrónica de mayor a menor energía, debido a la excitación previa de sus electrones [15]. A diferencia de otros fenómenos similares como la incandescencia, la radiación emitida se considera completamente distinta de la producida en virtud de la temperatura. Asimismo, dependiendo de la causa de la excitación de los electrones, la luminiscencia se clasifica en fotoluminiscencia, electroluminiscencia, quimioluminiscencia, bioluminiscencia, cátodoluminiscencia, mecanoluminiscencia y termoluminiscencia [19].

Por lo general, en la fotoluminiscencia la excitación se produce mediante radiación ultravioleta, la cual sigue la ley de Stokes de fluorescencia [19]. Esta condición es expresada en la relación (2), donde la longitud de excitación es más corta que la longitud de onda de emisión [20].

$$\lambda_{exc} < \lambda_{em} \quad (2)$$

Los fotones emitidos son generados a partir de las transiciones electrónicas en el material: la energía es absorbida cuando un electrón cambia a un estado más energético (excitación), pero se emite luz visible cuando vuelve al estado de baja energía (emisión o relajación). En añadidura, dependiendo del tiempo de retardo entre la excitación y la emisión, la luminiscencia se clasifica en dos tipos: fluorescencia; para tiempos de retardo del orden de nanosegundos, y fosforescencia; para tiempos de retardo cercanos o mayores a un segundo [17].

En los billetes, se suelen emplear pigmentos fluorescentes como característica de seguridad de segundo nivel, con longitudes de excitación óptimas de 254 nm y 365 nm principalmente [15], [22]. No obstante, estos pigmentos pueden caracterizarse por las longitudes de onda que absorben o emiten. Las longitudes de onda de excitación no se restringen a la región visible, pues lo habitual es que estén en la región UV [21].

Técnicas espectroscópicas de análisis

La espectroscopía es el desarrollo de procedimientos instrumentales en los que se obtiene información de la estructura molecular, a través de un análisis detallado de la absorción, dispersión y emisión de radiación electromagnética por los compuestos analizados [23]. Así, la espectroscopía de fluorescencia molecular se utiliza para obtener información de la energía de transición electrónica, el entorno molecular y las interacciones intermoleculares que afectan la emisión de fluorescencia [23], [24]. Para estas técnicas espectroscópicas, el rango que suele considerarse es el ultravioleta-visible (UV-VIS).

Además de la espectroscopía de fluorescencia, la espectroscopía infrarroja ha sido ampliamente utilizada para el estudio de los materiales. La energía de los fotones de la región IR no es suficiente para excitar los electrones de los átomos, pero sí para inducir excitaciones vibracionales en los enlaces covalentes de las moléculas. El principio de los espectrómetros IR es similar al principio del espectrómetro UV-VIS, permitiendo obtener la absorción intrínseca que son resultado de la estructura del material [23].

Para el análisis espectroscópico IR, se mide la transmitancia (T) o, de forma alternativa, la absorbancia (A), en función del número de onda, correspondiente al inverso de la longitud de onda de la radiación, con unidades de cm^{-1} . La relación entre absorbancia y transmitancia se expresa en la ecuación (3).

$$A = -\log_{10}T \quad (3)$$

Donde la transmitancia T se define como el cociente de la intensidad del haz transmitido y la intensidad del haz incidente. Del análisis de los espectros IR, se obtiene información de los grupos funcionales y de los materiales con enlaces covalentes (orgánicos, cerámicos, poliméricos, etc.), así como de las sustancias presentes, dado que cada compuesto químico posee un espectro único [25].

Cabe señalar que los espectros IR en la región de 1450 cm^{-1} a 600 cm^{-1} se les denomina región de huella digital, debido a la complejidad y exclusividad de los patrones medidos. Por el contrario, en la zona de absorción de los grupos funcionales, correspondiente a la región entre 4000 cm^{-1} a 1450 cm^{-1} , se producen bandas anchas y algunos picos correspondientes a las vibraciones de tensión en las unidades diatómicas [23].

Materiales y métodos

Muestras

Se emplearon billetes de todas las denominaciones actualmente en circulación: mil colones de la serie C, dos mil colones de la serie B, cinco mil colones de la serie C, diez mil colones de la serie B y veinte mil colones de la serie B; obtenidos en la ciudad de Cartago, Costa Rica en julio de 2024. Se aseguró que las muestras estuvieran en buen estado, sin partes faltantes y que las marcas fluorescentes fueran claramente visibles.

Instrumentos y adquisición de datos

Para la identificación de las marcas fluorescentes, se empleó una lámpara UV LED61 de la marca AccuBANKER USA con un máximo de emisión en 365 nm. Seguidamente, se fotografió cada billete iluminado con luz ultravioleta, como se muestra en la *Figura 2*.

Para la medición de los espectros de emisión y excitación, se empleó el espectrofluorímetro FluoroMax Plus de la marca Horiba Scientific, del Laboratorio de Espectroscopía, Imagen y Color (LEMIC) del Tecnológico de Costa Rica. Este se compone de una lámpara de arco de Xenón, un fotomultiplicador sensible de 185 nm a 850 nm y un fotodiodo de referencia. Además, para la selección de la longitud de onda de emisión o excitación en los monocromadores, el espectrofluorímetro integra dos rejillas de difracción de 1200 ranuras/mm.

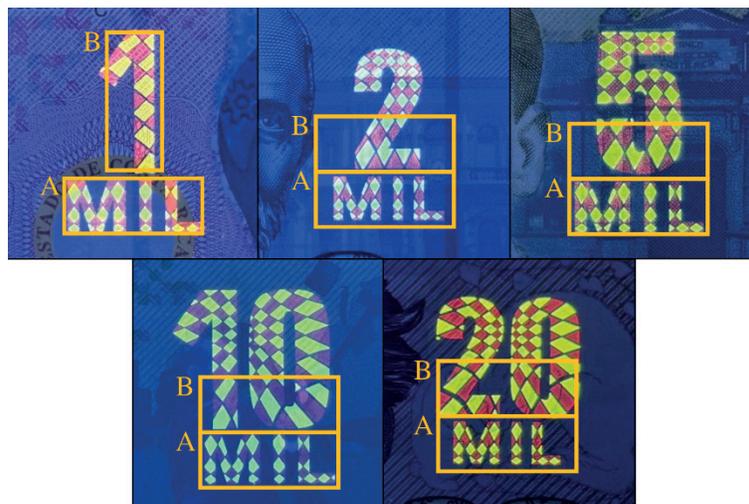


Figura 2. Identificación de las marcas fluorescentes en los billetes donde se realizaron las mediciones de los espectros de emisión y excitación.

Para los espectros de emisión y excitación se tomó un tiempo de integración de 0,1 s y un ángulo de incidencia normal de 10° . Para los espectros de emisión-excitación 3D, se definió un rango de excitación entre 335 nm y 380 nm, y un rango de emisión entre 400 nm y 670 nm. Para cada billete, se delimitaron dos zonas de medición en la marca fluorescente principal de la denominación, tal como se muestra en la *Figura 2*. Además, se tomaron espectros de emisión para una excitación de 365 nm en un rango de 400 nm a 700 nm, y se tomaron los espectros de excitación para las máximas intensidades de emisión en las zonas A y B de los billetes analizados.

Por otra parte, para la medición de los espectros infrarrojos, se empleó el espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) Nicolet iS5 de la marca Thermo Scientific, del LEMIC. Este posee una resolución espectral de $0,8 \text{ cm}^{-1}$ y un rango de medición desde

4000 cm^{-1} hasta 500 cm^{-1} . Se empleó el accesorio de Reflectancia Total Atenuada (ATR), que permite obtener espectros de muestras sin ningún tipo de preparación adicional. Con este equipo se tomó el espectro IR del sustrato en dos posiciones de la ventana transparente, en la palabra “mil” de la marca fluorescente principal y en el mapa iridiscente, tal como se muestra en la *Figura 3*. Este proceso se repitió empleando posiciones relativas aproximadas para todas las denominaciones de billetes analizados. Cabe señalar que se midió un espectro de fondo antes de cada medición y se aplicó un filtro ATR que elimina los máximos de absorbancia debido al CO_2 .



Figura 3. Identificación de las marcas en el billete de mil colones donde se realizaron las mediciones de los espectros infrarrojos.

Procesamiento de datos

Para el procesamiento y análisis de los datos obtenidos, se empleó el lenguaje de programación R [26]. En conjunto, se utilizaron paquetes como “tidyverse” [27] para la manipulación de datos, “ggpmisc” [28] como complemento a la generación de gráficas, “photobiology” [29] para la identificación de los máximos locales, “plotly” [30] para la generación de gráficas en tres dimensiones y “cooltools” [31] para la representación de longitudes de onda en formato de color RGB.

A partir de los espectros de fluorescencia, se determinaron los máximos de emisión para diferentes excitaciones y los máximos de excitación que estimulan la emisión. Con los espectros infrarrojos, se determinaron los máximos de absorbancia característicos para cada zona de los billetes analizados. Posteriormente, se compararon los máximos de absorbancia con los expresados en la literatura para la identificación del material del sustrato.

Resultados

Espectros de emisión y excitación

Todos los billetes analizados mostraron máximos de emisión semejantes y un comportamiento espectral similar. Como se muestra en la *Figura 2*, las marcas fluorescentes de todas las denominaciones presentan un patrón en rombos curvo con dos colores principales: rojo y verde amarillo. Pese a ello, los resultados de los máximos de emisión para cada billete analizado se enlistan en el *Cuadro 1* para su comparación. Se observaron pequeñas diferencias en la posición de los máximos entre las dos zonas consideradas del billete, por lo que en el cuadro se representan valores y rangos de longitudes de onda.

Como se observa en el *Cuadro 1*, todos los billetes presentan un máximo de emisión común en 610 nm, correspondiente al color rojo, y entre 586 nm y 590 nm, que corresponde al amarillo. Además, existen diferencias significativas entre denominaciones en los máximos correspondientes al color verde. Pese a las diferencias, la mayoría de los billetes presentan máximos de emisión en posiciones cercanas entre sí. Estas pequeñas discrepancias pueden deberse a la presencia de algún contaminante en el momento de tomar el espectro, al propio desgaste del billete, a cambios en la composición de las tintas de impresión u otras causas en el proceso de producción [9]. Se requieren más estudios que permitan determinar las causas de estas diferencias.

Cuadro 1. Máximos de emisión en la marca fluorescente principal para diversas denominaciones.

Denominación (colones)	Emisión (nm)	Color correspondiente
Mil	608 – 610, 618	Rojo
	586 – 588	Amarillo
	536	Verde
Dos mil	610	Rojo
	588 – 590	Amarillo
	510 – 514	Verde
Cinco mil	610	Rojo
	586 – 590	Amarillo
	514	Verde
Diez mil	610, 620	Rojo
	586 – 588	Amarillo
	506 – 510	Verde
Veinte mil	610, 614, 620	Rojo
	586	Amarillo
	532, 546	Verde

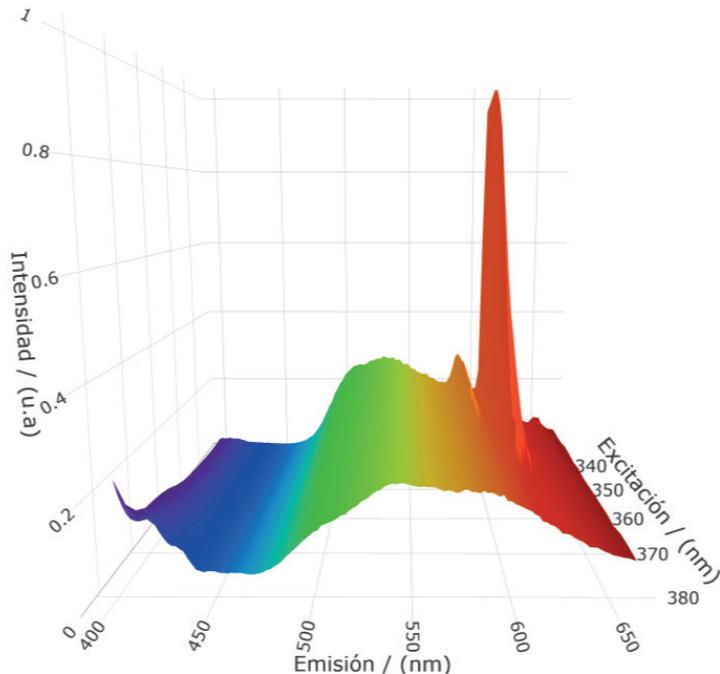


Figura 4. Espectro de emisión-excitación 3D en la zona B del billete de mil colones.

Como se observa en la *Figura 4*, existe una emisión significativa cercana a 610 nm, para excitaciones menores a 360 nm. La mayor intensidad del máximo de emisión en 610 nm podría explicarse porque el área iluminada de los rombos rojos es mayor que el de los rombos verde amarillos de la marca fluorescente, lo que favorece una mayor emisión en las longitudes de onda asociadas al color rojo. Otra causa que podría explicar una mayor intensidad del máximo de 610 nm es la diferencia en la eficiencia cuántica de las tintas fluorescentes.

Además, en la *Figura 4* se identifican otros máximos locales de emisión en 532 nm y 586 nm. Estos máximos están relacionados con los pigmentos fluorescentes que emiten en verde y amarillo, como se detalla en el *Cuadro 1*. Sin embargo, en las imágenes de los billetes solo se distinguen dos colores principales: rojo y verde-amarillo. Esto sugiere que la *Figura 4* representa la superposición de los espectros emitidos por los pigmentos fluorescentes.

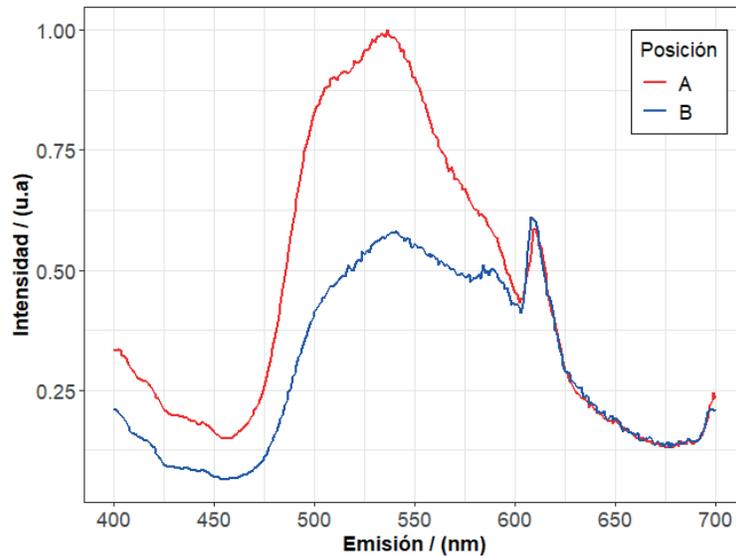


Figura 5. Espectro de emisión de la marca fluorescente en el billete de mil colones para una excitación de 365 nm.

Como se observa en la *Figura 5*, hay una mayor intensidad en la posición A que en la posición B para longitudes de onda entre 400 nm y 600 nm, con máximos de emisión alrededor de 536 nm y 610 nm. De igual forma que en el espectro de emisión-excitación 3D, estas diferencias de intensidad pueden deberse a diferencias en las proporciones de área fluorescente iluminada y a las eficiencias cuánticas de cada pigmento.

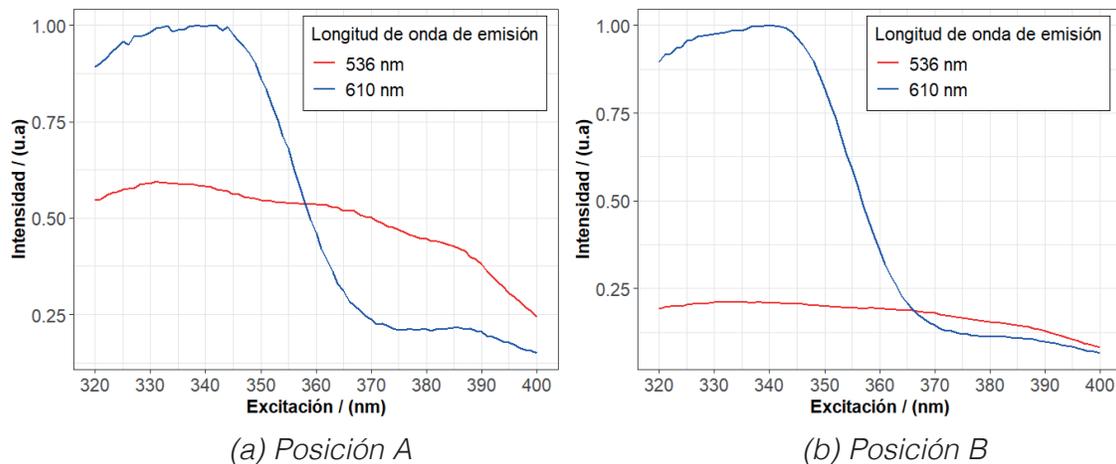


Figura 6. Espectros de excitación en las zonas analizadas de la marca fluorescente del billete de mil colones, para dos emisiones distintas.

Por otra parte, en la *Figura 6* se presentan los espectros de excitación para las emisiones en 536 nm y 610 nm, en ambas posiciones. Se aprecia que la mayor emisión ocurre en 610 nm cuando la excitación es 341 nm. Para la emisión de 536 nm, el máximo se presenta cuando la excitación es 331 nm, con una menor intensidad relativa en comparación con la emisión de 610 nm. En el *Cuadro 2* se muestran los máximos de excitación para los principales máximos de emisión en todas las denominaciones.

Cuadro 2. Excitaciones asociadas con la emisión máxima en las zonas analizadas para diversas denominaciones.

Denominación (colones)	Máximo de emisión (nm)	Máximo de excitación (nm)
Mil	532	331
	610	341
Dos mil	510	320
	610	339
Cinco mil	510	320
	610	341
Diez mil	510	335
	610	335
Veinte mil	510	335
	610	335

Espectros infrarrojos

Dado que los espectros infrarrojos de todas las denominaciones son similares entre sí, únicamente se presentan los resultados para el billete de mil colones, que se muestra en la *Figura 7*.

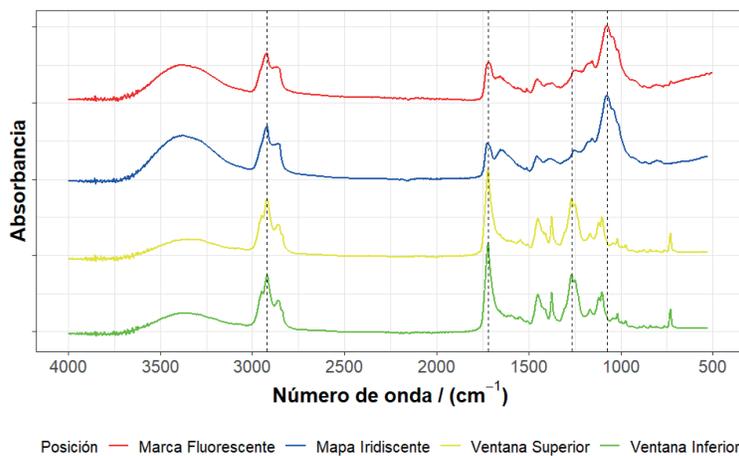


Figura 7. Espectros infrarrojos en zonas clave del billete de mil colones.

Los espectros para la zona inferior y superior derecha de la ventana transparente presentan máximos de absorbancia en las mismas posiciones, con ligeras diferencias en la intensidad. En la región de grupos funcionales, el pico de mayor absorbancia se encuentra en 1720 cm⁻¹, seguido por 2919 cm⁻¹, 2948 cm⁻¹, y 2863 cm⁻¹. Cabe resaltar que dichos máximos concuerdan con los presentados por Smith [31] para el polipropileno, específicamente para las vibraciones de grupos metilo (CH₃) y metileno (CH₂).

En cuanto a la región de huella digital, destacan máximos en 1267 cm⁻¹, 1248 cm⁻¹, 1102 cm⁻¹, así como en 1375 cm⁻¹ y 1449 cm⁻¹, siendo estos característicos del sustrato de polipropileno [31]. Por ende, los demás picos de absorbancia en dicha zona pueden deberse a la capa de barniz o a las tintas del billete.

Por otra parte, la absorbancia máxima en el rango de 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} corresponde a la presencia de humedad en la medición, la cual se observa en todos los espectros IR medidos. Esto se debe a las vibraciones de tensión de grupos funcionales que contienen hidrógeno, como el hidroxilo (-OH) [23].

En el espectro IR del mapa iridiscente se muestra máximos de absorbancia similares en la región de grupos funcionales. Los más destacables corresponden al sustrato de polipropileno en 2921 cm^{-1} , 1724 cm^{-1} y 2858 cm^{-1} , seguido del máximo por el efecto del agua en 3386 cm^{-1} . No obstante, existen diferencias significativas en la región de huella digital entre la zona de marca fluorescente e iridiscente y la zona de la ventana transparente. Tanto en el mapa iridiscente como la marca fluorescente, resalta un pico de absorbancia en 1076 cm^{-1} , el cual puede deberse a vibraciones de tensión en enlaces del tipo C-C, C-O y C-N, o inclusive a vibraciones de flexión en los compuestos de las tintas [23].

Conclusiones y recomendaciones

A partir del análisis de los espectros de emisión y excitación de las marcas fluorescentes en los billetes actualmente en circulación en Costa Rica, se puede concluir que el comportamiento espectral observado en todas las denominaciones es consistentemente similar, lo que permite utilizar el billete de mil colones como ejemplo representativo. La presencia de máximos de emisión comunes en 610 nm para el color rojo, junto con máximos en 586 nm a 590 nm y 510 nm a 540 nm para el verde amarillo, indica que los materiales fluorescentes utilizados en los billetes presentan características muy semejantes en su color aparente, aunque con diferencias espectroscópicas mesurables cuando se utiliza equipo especializado. Dicha semejanza es crucial en la autenticación de los billetes, pero las pequeñas diferencias resaltan la importancia de las medidas espectrales para el análisis de características de seguridad.

La espectroscopía de fluorescencia permite identificar variaciones en los máximos de emisión entre las diferentes zonas del mismo billete, así como entre diferentes denominaciones. Estas diferencias podrían deberse a factores como el desgaste, exposición a condiciones adversas, diferencias en las tintas, presencia de contaminantes o diferencias en las eficiencias cuánticas de los pigmentos. Por consiguiente, los procesos de autenticación mediante espectroscopía deberían considerar dichas variaciones para evitar errores. Las diferencias encontradas permiten orientar el desarrollo de más estudios para cuantificar la dispersión de las mediciones y la consistencia de los resultados, considerando factores adicionales como la serie de los billetes y la casa fabricante.

Cabe resaltar las diferencias en la intensidad de emisión entre zonas del mismo billete, como se mostró en los espectros del billete de mil colones. La mayor intensidad de emisión del verde o del rojo podría deberse a diferentes proporciones de área excitada de los patrones romboidales fluorescentes, lo que sugiere que la orientación y la posición del billete durante el análisis espectroscópico son factores determinantes. Esto podría controlarse ajustando con precisión la posición de las marcas fluorescentes y reduciendo el tamaño del área excitada.

En cuanto a los espectros IR, se identificaron características típicas del sustrato de los billetes, especialmente en las zonas de la ventana transparente, el mapa iridiscente y la marca fluorescente. La identificación de picos de absorbancia asociados al polipropileno y otros materiales del billete permite corroborar la composición de estos y proporciona características adicionales para la detección de falsificaciones. Las diferencias en la región de huella digital entre la zona del mapa iridiscente y la marca fluorescente, y la zona de la ventana transparente parecen estar asociadas con los compuestos de las tintas.

Finalmente, las mediciones de los espectros IR mostraron un máximo común en la región de 3500 cm^{-1} a 3000 cm^{-1} debido a la presencia de humedad, lo cual es un factor para considerar en futuros análisis. En última instancia, es recomendable realizar los análisis en condiciones ambientales controladas para reducir la influencia de la humedad.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Escuela de Física del Instituto Tecnológico de Costa Rica y de la coordinadora de trabajos finales de graduación, la Dra. Laura Rojas Rojas, por su apoyo en la escritura de artículos científicos como nueva alternativa para cumplir los requisitos de graduación del programa de Licenciatura en Ingeniería Física. Adicionalmente, agradecemos el apoyo del departamento de Emisión y Valores, de la división Sistemas de Pago del Banco Central de Costa Rica, a cargo del Ing. Juan José Leiva, por su apoyo y compromiso en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

- [1] L. G. Ramírez Rivera y R. L. Guerrero Macías, "Características de seguridad en el papel moneda mexicano", *Skopein: La justicia en manos de la Ciencia*, no. 21, pp. 28-37, 2020. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7701850>
- [2] Banco Central de Costa Rica, "Numerario presuntamente falso", 2024. <https://www.bccr.fi.cr/billetes-y-monedas/seguridades/contra-la-falsificación-de-numerario> [Ingresado el: 23/07/2024].
- [3] M. Mann, S. K. Shukla, y S. Gupta, "A comparative study on security features of banknotes of various countries", *International Journal of Multidisciplinary Research and Development*, vol. 2, no. 6, pp. 83-91, 2015.
- [4] M. B. Chacón Hidalgo, *Del papel moneda a los billetes de banco en Costa Rica (siglo XVIII-2018)*, 1ra ed. San José, Costa Rica: Fundación Museos Banco Central de Costa Rica, 2019.
- [5] K. Corbin, "Falsificación de Polímeros: Ni Sencilla, Ni Barata, Ni Eficaz", *Currency News*, vol. 20, no. 10, p. 8, 2022.
- [6] R. Ferrero y B. Montrucchio, "Banknote identification through unique fluorescent properties", *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 21, no. 2, pp. 1-12, Mar. 2024. <https://doi.org/10.1109/TDSC.2023.3267166>
- [7] H. Wang y L. Sun, "Materials and Society: Functional Chemicals and Materials in Banknote and Security Paper", *Accounts of materials research*, vol. 2, no. 1, pp. 1-6, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.0c00071>
- [8] A. R. Novais Rodrigues, F. L. Melquiades, C. R. Appoloni, y E. N. Marques, "Characterization of Brazilian banknotes using portable X-ray fluorescence and Raman spectroscopy", *Forensic Science International*, vol. 302, p. 109872, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2019.06.030>
- [9] M. Mikulicova, O. Zimek, y V. Kresalek, "FLUORESCENCE OF SELECTED POLYMER BANKNOTES", *Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium*, pp. 746-752, Jan. 2019. <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.102>
- [10] E. Sonnex, M. J. Almond, J. V. Baum, y J. W. Bond, "Identification of forged Bank of England £20 banknotes using IR spectroscopy", *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*, vol. 118, pp. 1158-1163, Jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2013.09.115>
- [11] R. M. Correia et al., "Banknote analysis by portable near infrared spectroscopy", *Forensic chemistry*, vol. 8, pp. 57-63, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.003>
- [12] V. da Silva Oliveira, R. S. Honorato, F. A. Honorato, y C. F. Pereira, "Authenticity assessment of banknotes using portable near infrared spectrometer and chemometrics", *Forensic science international*, vol. 286, pp. 121-127, May 2018. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.001>
- [13] K. Itrić, M. Vukoje, y D. Banić, "FT-IR spectroscopy as a discrimination method for establishing authenticity of euro banknotes", *Acta graphica*, vol. 29, no. 2, pp. 27-30, Jan. 2019. <https://doi.org/10.25027/agj2017.28.v29i2.156>
- [14] P. Kumar et al., "Comparative Analysis of Security Features in Banknotes Across Various Global Economies using VSC®-8000/HS", *International Journal For Multidisciplinary Research*, vol. 5, no. 5, Oct. 2023. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i05.7717>

- [15] J. Mutanen, T. Jaaskelainen, y J. P. S. Parkkinen, "Luminescent Security Properties of Banknotes", *Society for Imaging Science and Technology: Image Processing, Image Quality, Image Capture, Systems Conference*, pp. 421–424, 2003.
- [16] E. Hecht, *Optics*, 5th ed. Pearson Education, 2017.
- [17] W. D. Callister, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 10ma ed., Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [18] A. Aguirre-Flores, "Espectroscopía Uv-visible (Uv-Vis).", 2018. [En línea]. <https://enengiedublog.wordpress.com/2018/01/29/espectroscopia-uv-visible-uv-vis/> [Ingresado el 14/08/2024].
- [19] S. Kasap, *Principles of Electronic Materials and Devices*, 4ta ed., Columbus, OH: McGraw-Hill US Higher Ed USE, 2018.
- [20] J. Jakob, "Polymeric Banknotes", Tesis para el grado de Bachiller en Ingeniería Informática, Tomas Bata University, Zlín, República Checa, 2019.
- [21] S. Constantakis, Ed., "Fluorescence", *World of Forensic Science*, vol. 1. Farmington Hills, MI: Gale, pp. 307–308, 2016.
- [22] R. Giri, P. Bhattarai, S. P. Chimouriya, and B. R. Ghimire, "Examination of Security Features in Nepali Currency of Denomination Rs. 500 and Rs. 1000 Using Video Spectral Comparator-6000", *Journal of Nepal Physical Society*, vol. 7, no. 4, pp. 36–42, Dec. 2021. <https://doi.org/10.3126/jnphysoc.v7i4.42929>
- [23] R. M. O. Mendoza, *Elementary Organic Spectroscopy*. Ashland: Arcler Press, 2019.
- [24] S. Constantakis, Ed., "Spectroscopy", *World of Forensic Science*, vol. 2. Farmington Hills, MI: Gale, pp. 634–638, 2016.
- [25] M. Hof y R. Macháň, "Basics of Optical Spectroscopy", *Handbook of Spectroscopy*, pp. 31–38, 2014.
- [26] R Foundation for Statistical Computing, "R: A Language and Environment for Statistical Computing", v.4.4.1, Vienna, Austria, 2024.
- [27] H. Wickham et al., "Welcome to the tidyverse", *Journal of Open Source Software*, vol. 4, no. 43, p. 1686, Nov. 2019. <https://doi.org/10.21105/JOSS.01686>
- [28] P. J. Aphalo, "ggpmisc: Miscellaneous Extensions to 'ggplot2'", 2024.
- [29] P. J. Aphalo, "The r4photobiology suite", *UV4Plants Bulletin*, vol. 2015, no. 1, pp. 21-29, 2015. <https://doi.org/10.19232/uv4pb.2015.1.14>
- [30] C. Sievert, *Interactive Web-Based Data Visualization with R, plotly, and shiny*, Chapman and Hall/CRC, 2020.
- [31] B. C. Smith, "The Infrared Spectra of Polymers III: Hydrocarbon Polymers", *Spectroscopy*, vol. 36, no. 11, pp. 22–25, 2021. <https://doi.org/10.56530/spectroscopy.mh7872q7>

Declaración sobre uso de Inteligencia Artificial (IA)

Los autores aquí firmantes declaramos que no se utilizó ninguna herramienta de IA para la conceptualización, traducción o redacción de este artículo.