

ESPECTROSCOPIA RAMAN DE COSTO REDUCIDO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LÍQUIDOS TRANSPARENTES

LOW COST RAMAN SPECTROSCOPY FOR THE IDENTIFICATION OF TRANSPARENT LIQUIDS

Oscar Urquidi

Ingeniería Electromecánica
Universidad Privada Boliviana
oscarurquidi@upb.edu

(Recibido el 28 mayo 2019, aceptado para publicación el 20 junio 2019)

RESUMEN

El trabajo presenta el desarrollo de un sistema de espectroscopia Raman de costo reducido (menor a 1000 USD), destinando a la detección de líquidos transparentes no identificables por métodos colorimétricos. Dadas las necesidades (en Bolivia) de control y fiscalización de compuestos químicos en productos locales e importados, el desarrollo de sistemas espectroscópicos moleculares se perfila como una solución accesible. El sistema desarrollado se basó en un espectrómetro clásico modificado, con una resolución de 2 nm y un ancho espectral de 200 nm. Para la generación de la dispersión Raman se usó un diodo láser de 405 nm y 5mW acoplado a un recipiente transparente y una lente auxiliar para la proyección de la luz sobre el plano de entrada. Como detector se usó una cámara CCD con refrigeración termoeléctrica, cuyas imágenes se integraron verticalmente para la obtención de los espectros. Como parte de las pruebas de validación, se obtuvieron espectros Raman de agua, etanol y acetato de etilo. Así mismo, se obtuvo el espectro de una mezcla de etanol y agua. En todos los casos se observó coincidencia entre los espectros obtenidos y los de referencia, validando su correcta detección. Como punto de mejora, se identificó la adición de filtros de corte específicos para mejorar el contraste y la resolución del sistema. Dados estos resultados, el sistema mostró un gran potencial como una herramienta analítica de bajo costo para compuestos moleculares.

Palabras Clave: Espectroscopia, Espectroscopia Raman, Espectroscopia Molecular, Espectroscopia Láser.

ABSTRACT

This work presents the development of a low-cost Raman spectroscopy system, aimed at the detection of clear liquids that cannot be detected using colorimetric methods. Given the needs (in Bolivia) of control and inspection of chemical compounds in local and imported goods, the development of molecular spectroscopy systems is presented as an accessible solution. The developed system was based on a modified version of a classic spectrometer, with a measured spectral resolution of 2nm and a width of 200nm. A 405nm and 5mW laser diode, a clear cuvette with the sample, and an auxiliary lens were used for the generation of Raman scattering. The system used a thermoelectrically cooled CCD camera as the detector and its images were integrated vertically for spectrum extraction. As part of validation tests, Raman spectra of water, ethanol and ethyl acetate were obtained. Also, the system was able to get a Raman spectrum from a mix of ethanol and water. In every case, there was a coincidence between the obtained spectra and the references, showing a correct detection. After these results, the system showed great potential as low cost analytic tool for detecting molecular compounds. The results also showed that resolution and contrast could be improved by the use of specific cutoff filters in future versions of the system.

Keywords: Spectroscopy, Raman spectroscopy, Molecular Spectroscopy, Laser Spectroscopy.

1. INTRODUCCIÓN

Según un informe reciente de la Oficina Económica y Comercial de la Embajada de España en Bolivia [1], el mercado farmacéutico boliviano presenta un desarrollo importante. Se puede resaltar que la demanda nacional de medicamentos genéricos es cubierta, en un 80%, por la producción local. El otro 20% de los medicamentos genéricos es importado, lo que no incluye a los medicamentos altamente especializados, que son importados en su totalidad. Con las características del mercado local, así como la prevalencia del comercio informal, se puede aproximar que el 20% del total de los medicamentos que se comercializan, entran a Bolivia de forma ilegal [1]. Dados estos datos, la relevancia de la aplicación de métodos analíticos en los procesos de fabricación y control de medicamentos, se hace evidente.

Según un estudio realizado por Euromonitor en Bolivia el año 2014 [2], el mercado del alcohol ilegal representa el 13% del volumen total del alcohol presente en el mercado. Así mismo, se mostró que el 55,3% del alcohol ilegal proviene del contrabando; el porcentaje restante se divide bebidas artesanales (35,5%), falsificaciones (7,5%), bebidas que evaden impuestos (0,8%) y sustitutos (0,8%). En términos económicos, este mismo estudio reveló que el estado de Bolivia deja

de percibir 101 millones de dólares por año debido a la existencia de alcohol ilegal. Entre las consecuencias estudiadas, Euromonitor identifica la presencia de compuestos tóxicos en bebidas alcohólicas como un serio riesgo para la salud. Considerando que el consumo de alcoholes diferentes al etanol puede generar consecuencias negativas en la salud [3], incluyendo la ceguera irreversible, la necesidad de su detección temprana es esencial.

En este sentido, en Bolivia existen laboratorios encargados de realizar los controles necesarios, en muchos casos aplicando métodos espectroscópicos. Es importante observar que las estrategias y los equipos utilizados en estos casos, no se enfocan en la identificación rápida o móvil. Así mismo, no existen equipos desarrollados localmente para este propósito, lo cual limita la capacidad operativa de los interesados, debido al alto costo asociado a equipos importados. Para el año en curso (2019), los precios de sistemas Raman comerciales en condiciones móviles oscilan entre 10,000 y 30,000 dólares americanos (FOB) [4].

Desde el año 2007, en Bolivia existe una línea de desarrollo tecnológico en el área óptica liderada por el Centro de Investigaciones Ópticas y Energéticas de la Universidad Privada Boliviana. En este centro se han desarrollado los primeros ejemplos de herramientas de análisis fisicoquímico del país, basadas en métodos espectroscópicos [5]–[8]. En trabajos publicados por Ormachea et al., se ha demostrado la aplicabilidad de estos sistemas en la detección de cromo en licores de curtido [8], así como el análisis de concentrados mineros por espectroscopia de emisión atómica inducida por radiación láser [9]. Esta línea de desarrollo promete un proceso de transferencia tecnológica, que abriría las puertas al uso de equipos de producción local.

Los métodos espectroscópicos basados en luz suelen separarse por su objetivo de detección. Existen métodos que aprovechan distintos fenómenos físicos de interacción materia-luz para la detección de elementos atómicos, así como compuestos moleculares. Para la detección de elementos atómicos, se usan métodos de espectroscopia de emisión y absorción atómica, en los que se fuerza a los átomos a absorber o emitir luz. En el caso de la detección de compuestos moleculares (puros o en mezcla), se aprovechan los fenómenos de interacción entre luz y moléculas [10]. Al margen de los métodos mencionados, en Bolivia se observa que en muchos casos se prefiere el uso de métodos colorimétricos [8] para realizar gran parte de los análisis, por los bajos costos asociados.

Entre los métodos más comunes para la detección de compuestos moleculares, está la espectroscopia de absorción infrarroja y la espectroscopia Raman [11]. Comúnmente los métodos para detección de compuestos moleculares son usados en la industria de alimentos, farmacéutica y el control de sustancias controladas [12]. Una aplicación importante es la identificación de compuestos líquidos claros [13], con los cuales no se pueden usar métodos colorimétricos convencionales. La detección rápida de este tipo de compuestos resulta importante en el contexto boliviano, poniendo como ejemplo el caso de la adulteración de bebidas alcohólicas con metanol u otros alcoholes.

En torno a lo presentado anteriormente, el presente trabajo traza el desarrollo inicial de una herramienta de análisis molecular de costo reducido, por medio de espectroscopia Raman. Su capacidad de trabajo en el espectro visible hace posible el uso de elementos ópticos convencionales, a diferencia de la espectroscopia infrarroja, cuyos elementos optoelectrónicos llevan costos prohibitivos. Existen ejemplos de sistemas de espectroscopia Raman que hacen uso de detectores CCD comerciales en búsqueda de una reducción de costos significativa [14], [15]. Como es descrito en [16], un sistema Raman funcional basado en un espectrómetro comercial, con una resolución espectral de 7.8 nm, puede ser construido por un costo de 3,300 dólares americanos. El sistema propuesto pretende demostrar la implementación de un sistema Raman a un costo menor que el de este último ejemplo. Se busca alcanzar este objetivo por medio de un espectrómetro clásico de diseño propio y una cámara CCD de características comerciales.

2. ESPECTROSCOPIA RAMAN

Como explican Ferraro *et al.* [17], al interactuar con las moléculas de un compuesto, la luz incidente de frecuencia ν_0 , es dispersada lateralmente. La luz dispersada puede ser de dos clases: Rayleigh y Raman (Figura 1). La dispersión de Rayleigh es intensa y presenta una frecuencia igual a la de la fuente ν_0 . Por otro lado, la dispersión Raman presenta una frecuencia desplazada $\nu_0 \pm \nu_m$, donde ν_m es una frecuencia vibracional molecular. Las líneas espectrales Raman cuentan con un desplazamiento de $\pm \nu_m$, estas se denominan líneas de Stokes y anti-Stokes. Este fenómeno tiene una intensidad muy baja, menos del 0.001% de la luz de excitación es convertida en radiación Raman y en condiciones óptimas puede llegar al 0.01% [18]. En la espectroscopia Raman, se busca medir el desfase ν_m de las líneas de Stokes respecto a ν_0 . El espectro Raman, compuesto por un conjunto de estas líneas, es usado para identificar y cuantificar distintos compuestos. Es usual representar la distribución espectral en cm^{-1} , una unidad que se define como $\hat{\nu} = \frac{\nu}{c} = \frac{1}{\lambda}$ y que se usa de forma intercambiable con la frecuencia.

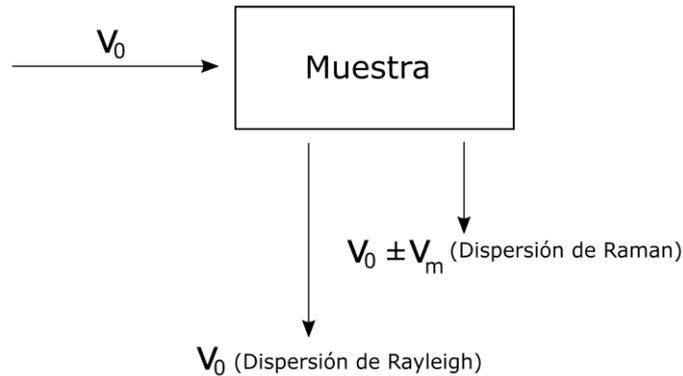


Figura 1: Mecanismos de dispersión de la luz [17].

De forma general, un sistema de espectroscopia Raman está compuesto por una fuente luminosa de excitación, un espectrómetro, un detector digital, filtros y elementos opto-mecánicos auxiliares [16]. Comúnmente, la fuente de excitación corresponde a un láser, cuya intensidad y monocromaticidad son elementos claves para obtener espectros intensos y resueltos. Así también, el detector debe tener la sensibilidad necesaria para detectar la débil señal Raman. Los detectores suelen ser del tipo CCD refrigerado, aunque existen sistemas que demuestran el uso de cámaras CCD convencionales [14].

3. DISEÑO DEL SISTEMA

Dentro de los criterios de diseño de un sistema Raman se encuentra la eficiencia lumínica, el ancho espectral y la resolución. En el sistema desarrollado se buscó un balance entre estos parámetros, tomando en cuenta que el ancho espectral debía ser lo suficientemente ancho para contener una sección significativa del espectro Raman. Así mismo la resolución debía ser suficiente para resolver la mayoría de las líneas, tomando en cuenta la baja densidad de líneas Raman, en comparación a los espectros de emisión atómica.

Dada la limitante de costo, se consideraron componentes comerciales para el diseño óptico del sistema. Se usó un esquema de espectrómetro clásico, basado en una rejilla de difracción por reflexión de 600 l/mm. Tanto la lente de colimación como el objetivo fueron seleccionados en base a su costo, disponibilidad y características técnicas; se seleccionaron objetivos para fotografía de 135mm/f3.5 y 50mm/f1.8 respectivamente. El diseño del espectrómetro clásico se modificó con la adición de un espejo, que permite la disposición de los elementos ópticos con un ángulo de 90°. Se agregó una lente auxiliar de 40mm/f2 después del recipiente de muestra para focalizar la luz Raman sobre la rendija. El sistema entero fue diseñado para ser impreso en 3D con plástico ABS. En la Figura 2 se puede observar la configuración del sistema óptico, así como los elementos que lo componen. Así mismo, la Figura 4 muestra el sistema construido y sus distintos módulos. La Tabla 1 muestra un análisis resumido de costos del sistema propuesto, el costo total del sistema fue de 650 dólares americanos.

El sistema se diseñó para presentar un ancho espectral aproximado de 200 nm. El cálculo se basó en la expresión $AE = 10^{-6} \cos(\beta) x / n f_2$, que relaciona la distancia focal del objetivo de salida (f_2) en mm, la densidad de la rejilla de difracción (n) en l/mm, el ancho efectivo del sensor (x) en mm, y el ángulo de difracción. Teniendo la posibilidad de rotar la rejilla de difracción, se consideró un ángulo de difracción central aproximado β de 20°, un ancho del sensor x de 6.4672 mm y una densidad n de 600 l/mm.

Dada la necesidad de un detector con alta sensibilidad, se usó una cámara CCD monocromática con un sensor Sony ICX419ALL [19] y refrigeración termoeléctrica. El sensor presentó una resolución de 752 x 582 píxeles y una sensibilidad espectral presentada en la Figura 3. Considerando la longitud de onda de la fuente de excitación (405nm), la detección de las líneas de Stokes (menos energéticas), y el ancho espectral de 200nm, el sensor fue capaz de detectar adecuadamente la luz Raman con una sensibilidad atenuada del 60% a los extremos (400 y 700nm respectivamente). La posibilidad de contar con un sensor CCD refrigerado a 12°C eliminó la necesidad de la captura de imágenes oscuras sin escena para la reducción de ruido aleatorio.

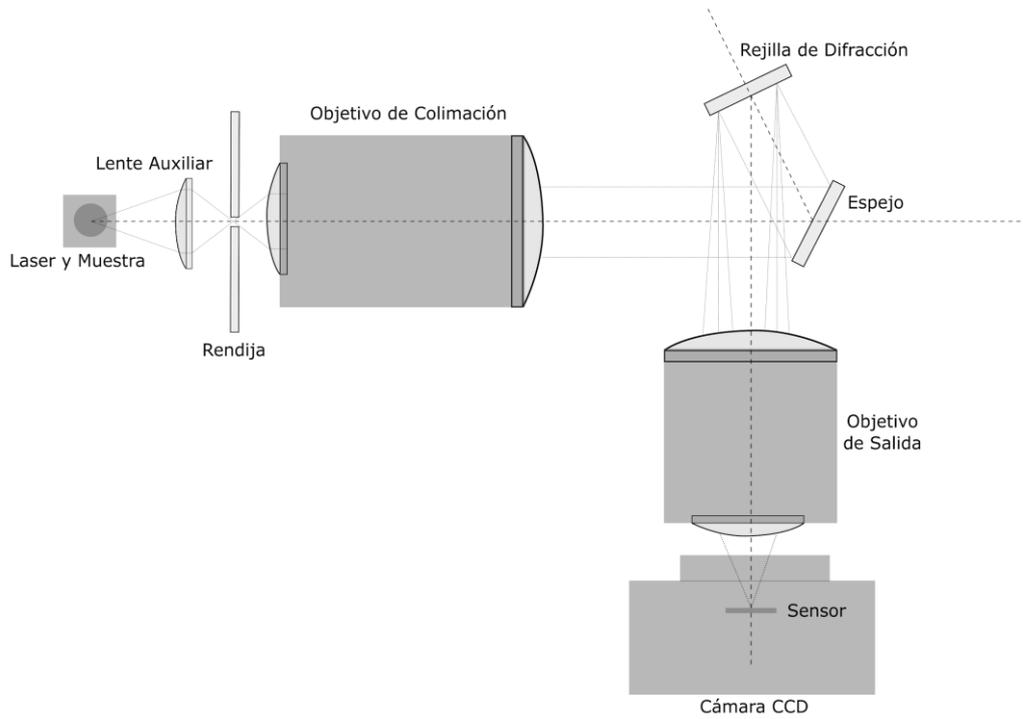


Figura 2: Esquema del sistema óptico propuesto para la detección de espectros Raman.

TABLA 1 - RESUMEN DE COSTOS DEL SISTEMA RAMAN PROPUESTO

Componente	Costo (\$)
Cámara CCD	400
Rejilla de difracción - 600 l/mm	100
Objetivos fotográficos y lentes	80
Diodo láser - 405nm	30
Elementos opto-mecánicos y piezas impresas en 3D	40
Total	650

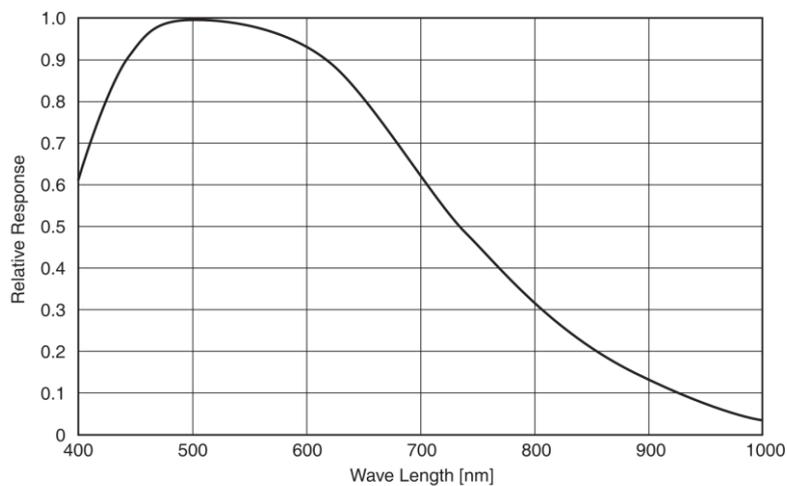


Figura 3: Respuesta espectral del sensor Sony ICX419ALL [19].



Figura 4: Sistema de espectroscopia Raman mostrando las partes externas: a) lente de 50mm, b) lente de 135mm, c) compartimento con rejilla de difracción y espejo, d) sistema de movimiento, e) cámara CCD, f) compartimento con la muestra, fuente láser, lente auxiliar y rendija de ancho ajustable.

La parte encargada de generar la dispersión Raman se ubicó frente a la rendija de entrada. Se usó una lente planoconvexa, ubicada a la mitad de su distancia focal, para recolectar la luz dispersada dentro de la muestra y focalizar en el plano de la rendija. La función de esta lente auxiliar fue incrementar el flujo de fotones Raman hacia el espectrómetro. Como fuente de excitación se usó un diodo láser de 405nm y 5mW. Se seleccionó un diodo láser de mayor energía (menor longitud de onda) para generar una mejor interacción con la matriz molecular y mayor intensidad en la luz Raman. Para realizar la medición se posicionó el haz láser de forma vertical paralela a la rendija, esto garantizó que el espectro sea tomado por todo el rango vertical del sensor y se incremente la intensidad de la señal respecto al ruido aleatorio. En el sistema no se consideró un filtro de corte específico debido a su alto costo relacionado (425 USD) [16]. La Figura 5 muestra una representación esquemática del sistema mencionado.

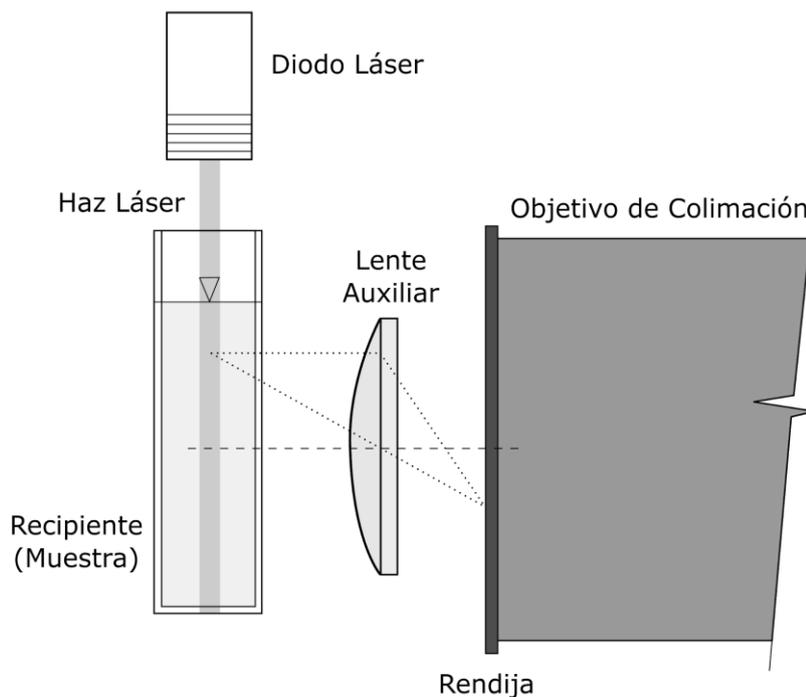


Figura 5: Esquema de la disposición del haz láser, muestra, lente y espectrómetro.

4. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Para la validación del sistema se trabajó sobre la identificación de tres compuestos líquidos claros: agua (H_2O), etanol (C_2H_5OH) y acetato de etilo ($C_4H_8O_2$). También se analizó una mezcla de agua y etanol esperando detectar la superposición de información espectral.

En la Figura 6 se muestra un resumen de las imágenes obtenidas por el detector para cada uno de los compuestos analizados, cada imagen se tomó con un tiempo de exposición de 30 segundos. Las imágenes fueron recortadas horizontal y verticalmente para mostrar la misma región de interés. Al lado derecho se puede observar una línea de gran intensidad, que corresponde a la dispersión de Rayleigh de la fuente de excitación. Por la configuración del espectrómetro, encontramos las líneas de Stokes a la izquierda de la línea de excitación.

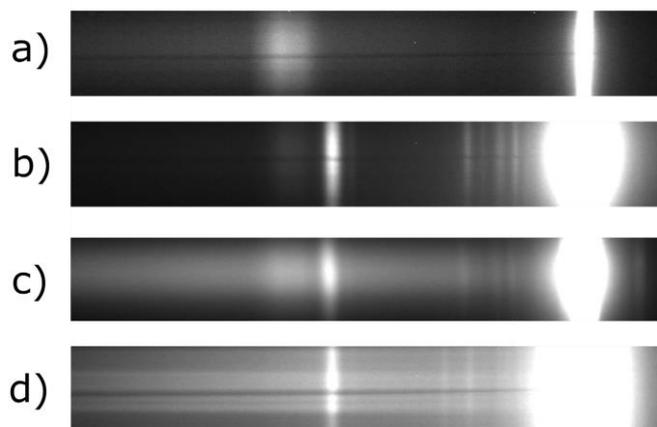


Figura 6: Imágenes recortadas de espectros Raman obtenidos: a) agua potable, b) etanol 96%, c) etanol 60%, d) acetato de etilo.

Para la obtención de los espectros se realizó una integración vertical de las intensidades de los píxeles en un programa desarrollado en Python. La calibración horizontal se realizó por medio de un ajuste polinómico con longitudes de onda conocidas (lámpara de Hg y fuentes láser de 405 y 532nm), luego se transformó el eje de longitudes de onda a frecuencias Raman (en cm^{-1}) referenciadas en la longitud de onda de excitación (405nm). En los espectros obtenidos se puede observar que el extremo derecho corresponde a la frecuencia de referencia de la fuente de excitación (con una longitud de onda de 405nm) correspondiente a 0 cm^{-1} . Bajo estas condiciones, cuanto más alejada hacia la izquierda se encuentre una línea Raman, mayor será su desplazamiento de frecuencia respecto a la fuente, por ende, la longitud de onda será mayor.

La Figura 7 muestra el espectro Raman de etanol, obtenido por nuestro sistema. Al mismo tiempo lo medido se contrasta con el espectro Raman obtenido por un sistema comercial de laboratorio [20]. Se puede observar una coincidencia en las líneas principales, lo que verifica una correcta identificación del compuesto. En este espectro también se observa como la resolución del sistema no alcanzó para separar algunos detalles, como las dos líneas encerradas por la región B. Usando la línea Raman de mayor intensidad del etanol, se midió el ancho a la mitad de intensidad para obtener una resolución efectiva de 2 nm FWHM, o aproximadamente 125 cm^{-1} (convirtiendo a unidades de frecuencia de desplazamiento Raman). En el espectro obtenido se observa también una fuerte señal de fondo, que afecta la intensidad relativa de las líneas Raman. Una de las principales causas de la señal de fondo distribuida fue la presencia de luz parásita en el sistema, originada por la intensa fuente de excitación. Así mismo, pudo existir una contribución en la señal de fondo debida a procesos de fluorescencia, un efecto que se intensifica con fuentes de excitación de corta longitud de onda [17].

La Figura 8 muestra el espectro Raman obtenido de una muestra de agua potable sin ningún tratamiento especial, en contraste con un espectro de referencia de agua destilada. En este caso, se puede identificar claramente la distribución espectral correspondiente al agua. Si bien no existen líneas marcadas, la distribución del espectro da suficiente información para asegurar su detección. En este espectro se observó una menor presencia de luz parásita y fluorescencia en la señal de fondo.

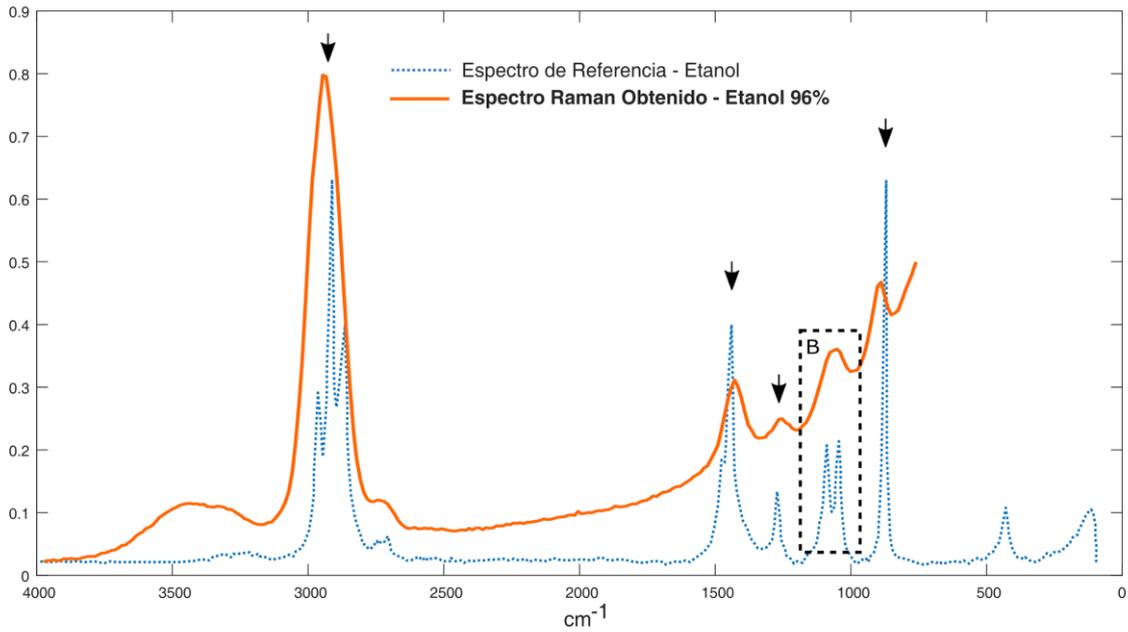


Figura 7: Superposición del espectro Raman de etanol al 96% obtenido por el sistema y un espectro de referencia [20].

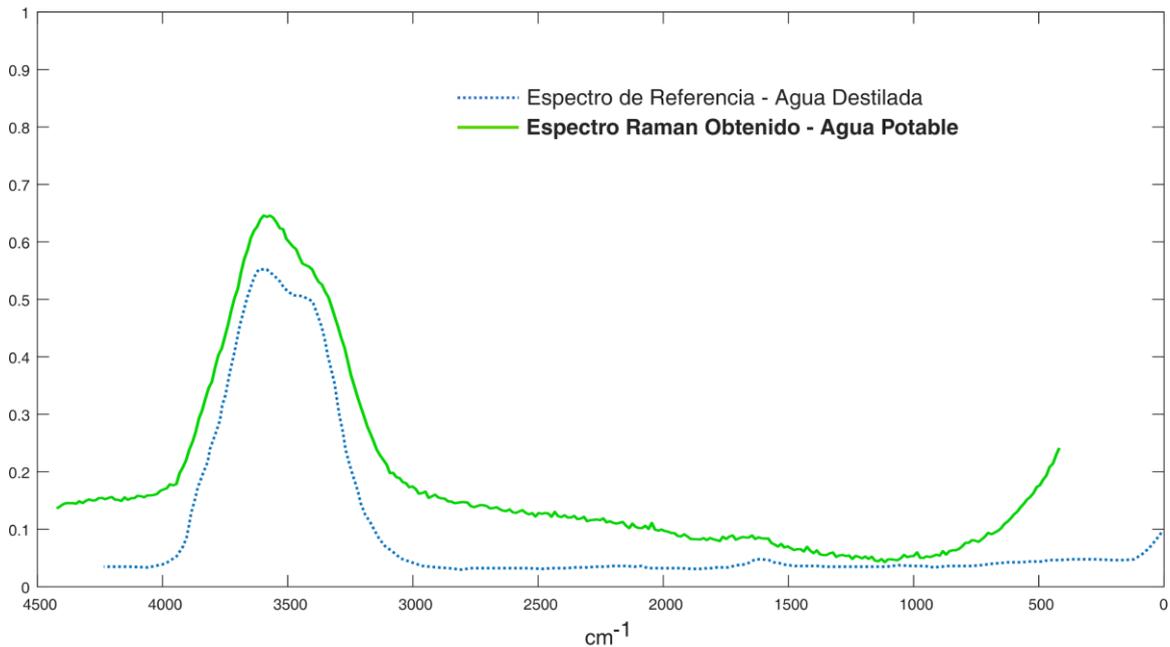


Figura 8: Superposición del espectro Raman de agua común obtenido por el sistema y un espectro de referencia [13].

La Figura 9 muestra el espectro Raman de acetato de etilo obtenido por el sistema, sobrepuesto al espectro del mismo compuesto obtenido por un sistema comercial de laboratorio [21]. Se observa que las líneas del espectro obtenido coinciden con las líneas principales del espectro de referencia. Al igual que en casos anteriores, la señal de fondo es atribuida a luz parásita generada por la fuente de excitación, así como procesos de fluorescencia. En este caso particular, la señal de fondo opaca las líneas con menor desfase Raman.

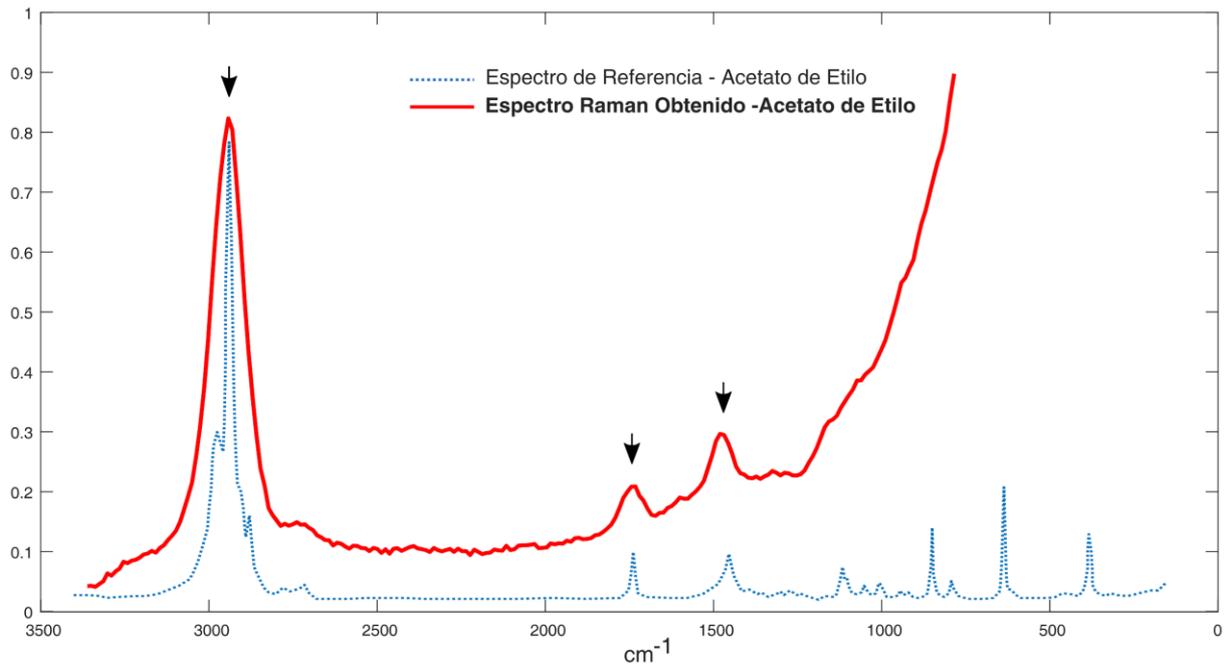


Figura 9: Superposición del espectro Raman de acetato de etilo obtenido por el sistema y un espectro de referencia [21].

Por último, se realizó una prueba de detección en una mezcla de dos compuestos. La Figura 10 muestra el espectro Raman de la mezcla de etanol y agua detectada por el sistema, así mismo se muestra el espectro Raman del etanol como referencia. Se puede observar claramente que, además de detectar las líneas principales del etanol, podemos detectar el agua en la parte del espectro encerrada por la región A.

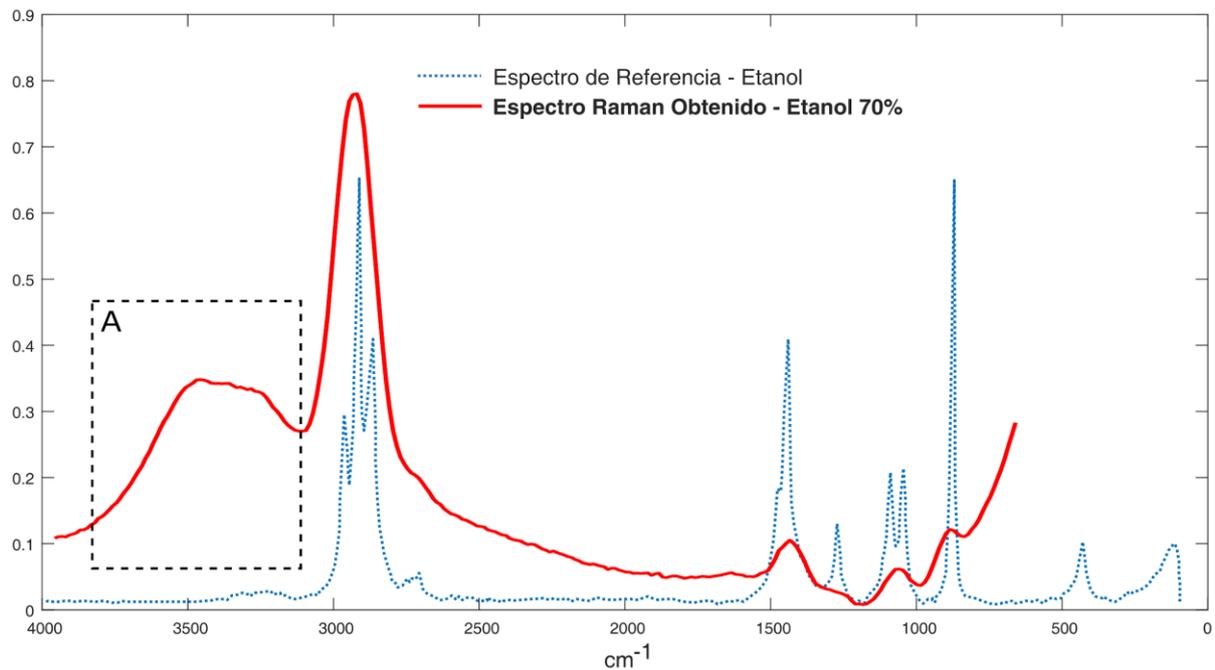


Figura 10: Superposición del espectro Raman de la mezcla de etanol y agua y un espectro de referencia [20].

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema Raman de costo reducido para la detección de líquidos claros. El sistema fue desarrollado enteramente en base a elementos comerciales, incluyendo una rejilla de difracción de reflexión, lentes de fotografía y una cámara CCD convencional de alta sensibilidad. Se demostró la capacidad de detección de líquidos totalmente claros

(agua, etanol, acetato de etilo), comparando los espectros obtenidos con espectros de referencia. Finalmente se lograron identificar compuestos diferentes en una mezcla (etanol y agua). Las variaciones en la señal de fondo presente en los espectros obtenidos fueron atribuibles a efectos de luz parásita y mecanismos de fluorescencia de distinta magnitud.

Si bien el sistema logró detectar espectros Raman de compuestos líquidos claros, la resolución no fue suficiente para resolver detalles espectrales relevantes. También, en el proceso de obtención de espectros, se encontró un marcado compromiso entre la apertura de la rendija y la intensidad del espectro, esto generó una fuerte relación directa entre la máxima resolución posible y el tiempo de integración del detector. Finalmente, se observó que la señal de fondo se perfila como un factor limitante del tiempo de integración del sensor, generando una relación directa con su intensidad.

Se considera que el sistema desarrollado muestra un camino correcto hacia el desarrollo de un sistema de detección de compuestos moleculares. Así mismo, plantea los desafíos a trabajar para concretarse como una solución efectiva. Si bien el sistema actual mostró una correcta detección de compuestos, será necesario explorar el uso de filtros de corte para filtrar la luz láser de excitación y así extender la aplicación a líquidos pigmentados, líquidos turbios e incluso sólidos. El costo total del sistema fue de 650 USD, siendo la cámara el elemento con mayor costo. Hasta este punto, el sistema muestra su potencial como solución de costo reducido, en la fiscalización y control de compuestos químicos en productos del mercado boliviano.

6. REFERENCIAS

- [1] Embajada de España en Bolivia, “EM Estudios De Mercado.” ICEX, 2018.
- [2] Euromonitor, “Análisis del Mercado Ilegal de Bebidas Alcohólicas en Bolivia.” CBN, 2015.
- [3] N. Olivier Pascual, J. Viéitez Vázquez, A. Arbizu Duralde, M. Asencio Durán, and N. Ruiz del Río, “Amaurosis bilateral como secuela de la intoxicación aguda por metanol: a propósito de un caso,” *Cuad. Med. Forense*, no. 32, Apr. 2003.
- [4] “Raman Spectrometers, Lasers, and Probes | StellarNet.us,” *StellarNet, Inc.* .
- [5] O. Ormachea and O. Urquidi, “Development Of A Diffraction Spectrometer And Its Control Program Using Commercial, Low-Cost Elements,” *Rev Cub Fis*, vol. 30, no. 2, 2013.
- [6] O. Ormachea, O. Urquidi, and D. Casazola, “Development of a portable low-cost LIBS system,” presented at the 8th Ibero American Optics Meeting/11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, Porto, Portugal, 2013, p. 87851D.
- [7] I. Terceros, O. Ormachea, O. Urquidi, and A. Villazón, “Development of a Low Cost Spectrometer with Adjustable Grid and Wireless Electronic Control,” *Rev. Politécnica*, vol. 37, no. 1, pp. 113–119, 2016.
- [8] O. Ormaechea, A. Villazón, and R. Escalera, “A spectrometer based on smartphones and a low-cost kit for transmittance and absorbance measurements in real-time,” *Opt. Pura Apl.*, vol. 50, no. 3, pp. 239–249, Sep. 2017.
- [9] O. Ormachea, A. Villazón, and I. Terceros, “Analysis Of Mining Ore Concentrates With A Low Cost Portable Libs System,” *Investig. Desarro.*, vol. 18, no. 1, pp. 81–90, Jul. 2018.
- [10] K. Nakamoto, *Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds*, 6th ed. Hoboken, N.J: Wiley, 2009.
- [11] V. Baeten and P. Dardenne, “Spectroscopy: Developments in instrumentation and analysis,” *Grasas Aceites*, vol. 53, no. 1, Mar. 2002.
- [12] Y.-S. Li and J. S. Church, “Raman spectroscopy in the analysis of food and pharmaceutical nanomaterials,” *J. Food Drug Anal.*, vol. 22, no. 1, pp. 29–48, Mar. 2014.
- [13] S. Burikov, T. Dolenko, S. Patsaeva, Y. Starokurov, and V. Yuzhakov, “Raman and IR spectroscopy research on hydrogen bonding in water-ethanol systems,” *Mol. Phys.*, vol. 108, no. 18, pp. 2427–2436, Sep. 2010.
- [14] A. P. Williamson and J. Kiefer, “Towards Low-cost Raman Spectroscopy by Using a Conventional CCD Camera,” in *Imaging and Applied Optics 2016*, Heidelberg, 2016, p. JT3A.10.
- [15] P. D. Barnett and S. M. Angel, “Miniature Spatial Heterodyne Raman Spectrometer with a Cell Phone Camera Detector,” *Appl. Spectrosc.*, vol. 71, no. 5, pp. 988–995, May 2017.
- [16] A. A. Huzortey, B. Anderson, and A. Owusu, “Designed and Developed Low Cost Raman Spectroscopic System,” in *Frontiers in Optics 2016*, Rochester, New York, 2016, p. JTh2A.95.
- [17] J. R. Ferraro, K. Nakamoto, and C. W. Brown, *Introductory Raman spectroscopy*, 2nd ed. Amsterdam ; Boston: Academic Press, 2003.
- [18] C. D. Allemand, “Design Criteria for a Raman Spectrometer,” *Appl. Opt.*, vol. 9, no. 6, p. 1304, Jun. 1970.
- [19] Sony, “ICX419ALL Datasheet”.
- [20] “Ethanol - SpectraBase.” [Online]. Available: <https://spectrabase.com/compound/Kn46yonbI3b#literature>. [Accessed: 29-May-2019].
- [21] “Ethyl acetate - SpectraBase.” [Online]. Available: <https://spectrabase.com/compound/6eOWaPkxx0o#HBXWCNUfifS>. [Accessed: 29-May-2019].