Infomin, Vol. 17, enero-diciembre 2025, E-ISSN: 1992-4194, https://infomin.edicionescervantes.com

Articulo original

Caracterización de minerales de interés económico en Cuba mediante microscopía raman confocal

Characterizationof minerals of economic interest in Cuba using confocal Raman microscopy

https://cu-id.com/2144/v17e07

Carlos A. Toledo Sánchez[1], Ileana Cabrera Díaz[1*], Marcela Figueredo Frías[1], Miladys Aróstegui Aguirre[2]

RESUMEN: El CIPIMM dispone desde hace relativamente poco tiempo de un Microscopio Raman Confocal, se trata de una técnica analítica muy útil para la minería, dado su carácter no destructivo, la rapidez con que realiza los análisis y su capacidad de investigar sustancias sólidas, liquidas y gaseosas, ofreciendo resultados tanto cualitativos como cuantitativos con relación a varios miles de minerales y también a otros compuestos asociados a la producción minera. Desde el comienzo de su explotación a inicios de 2022, este equipo ha sido utilizado en decenas de problemáticas recogiéndose en el trabajo, a modo de ejemplo, su aporte en la caracterización de Sulfatos de Níquel vinculados a productos derivados de esta industria, investigación mineralógica de menas de Cromitas de Camagüey, estudio de concentrados de Zinc y Plomo de Pinar del Río, así como varias temáticas vinculadas a la explotación del Oro, las que van desde la prospección, hasta el proceso extractivo y los reactivos que intervienen en el mismo. El trabajo se ilustra con espectros e imágenes y persigue establecer el debate, y con ello la colaboración entre los investigadores para fomentar la utilización de esta nueva tecnología en los sectores no solo mineros, sino también geológicos y relacionados con temas ambientales.

Palabras clave: microscopía Raman Confocal, minería del níquel, cromo, oro.

ABSTRACT: The Investigation Center for Mining and Metallurgical Industry (CIPIMM) recently received a Confocal Raman Microscope, it is an analytical tool very useful for mining for the reason of its non destructive character, speed and capability of dealing with solid, liquid and gaseous samples, giving qualitative and quantitative results associated with thousands of minerals and also other mining useful substances. Since the beginning of 2022 this equipment has been used in a variety of topics. There are showed Nickel Sulphate characterizations from the Nickel production, Chromium ores from Camaguey province and Zinc/Lead concentrated from Pinar del Río have been studied also. Gold production is in the scope of this instrument, not only from the prospection point of view, but also in the processing industry and its environmental impact. In the presentation there are images and spectrums of different results and the main subject is to stimulate debate among researchers. Not only Mining, but also Geology and Environmental considerations are traded.

Keywords: Confocal Raman Microscopy, Nickel, Chromium and Gold mining.

INTRODUCCIÓN

La minería se inicia con la prospección de minerales de interés y culmina con la obtención de los productos finales y la valoración y minimización del impacto en el medio ambiente. Todo este trabajo es apoyado por la Microscopía Raman Confocal (MRC), partiendo de la caracterización de rocas y minerales del terreno, abarcando tanto los componentes mayoritarios como minoritarios y trazas, ofreciendo resultados cualitativos y cuantitativos con rapidez y sin destruir las muestras, dando información sobre el comportamiento esperado de los diferentes minerales en el proceso productivo, ya sea aportando elementos de interés, como favoreciendo o entorpeciendo las diferentes etapas de producción. De igual forma la MRC permite caracterizar reactivos y sustancias que se utilizan en la industria minera, para valorar si cumplen con los parámetros requeridos, estudiar la marcha de las diferentes etapas del procesamiento y la posible aparición de productos indeseados. Una vez estudiados los diferentes procesos, la MRC aporta información sobre los productos finales,

Recibido: 07/05/2025
Aprobado en su forma original: 14/12/2025

[1]Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica (CIPIMM), Carretera Varona No. 12028, km 1½, Boyeros, Ciudad Habana, Cuba. E-mail: marcela@cipimm.minem.cu
[2]Empresa Central de Laboratorios, José Isaac del Corral. LACEMI. Prolongación de Vía Blanca s/n entre Línea del Ferrocarril y Virgen del Camino, C.P 11000, San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba. E-mail: miladys@lacemi.minem.cu
[*]Autor para correspondencia: icabrera@cipimm.minem.cu

Conflicto de Intereses: Los autores de este trabajo declaran que no existe conflicto de intereses.
Contribuciones de los autores: Investigación: Carlos A. Toledo Sánchez, Ileana Cabrera Díaz, Marcela Figueredo Frías, Miladys Aróstegui Aguirre. **Metodología:** Carlos A. Toledo Sánchez, Ileana Cabrera Díaz, **Análisis formal:** Carlos A. Toledo Sánchez, Ileana Cabrera Díaz, Marcela Figueredo Frías, Miladys Aróstegui Aguirre. **Redacción - primera redacción:** Carlos A. Toledo Sánchez. **Redacción - revisión y edición:** Carlos A. Toledo Sánchez.
Artículo bajo licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0)

tanto los de interés económico, como las gangas, escombreras y colas, y la manera en que estas pueden impactar el medio ambiente, introduciendo por ejemplo metales pesados o potenciales sustancias agresivas o dañinas como los asbestos. La utilización de esta técnica en la industria minera se ilustra en este trabajo principalmente en extracción de Níquel, Cromo, Zinc, Plomo y Oro, pero muchos de los procedimientos mostrados son aplicables a otros minerales.

Debe destacarse que en los últimos años la MRC ha ganado un especio significativo entre las técnicas analíticas empleadas como apoyo a las actividades mineras y geológicas, esto se debe a la rapidez con que brinda sus resultados, su confiabilidad y a la posibilidad de analizar muestras sólidas, liquidas y gaseosas sin dañarlas, así como de brindar un mapa de la distribución de los diferentes minerales en la roca.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las muestras se analizaron por lo general de forma directa, aunque en algunos casos fueron incluidas en resinas y luego pulidas, tanto para facilitar su análisis como para evitar contaminaciones y alteraciones superficiales. En algunos casos, por tratarse de partículas, estas fueron previamente fijadas en cinta adhesiva de doble capa, con el objetivo de evitar su pérdida, así como para favorecer su ulterior localización en el equipo.

Para la realización de los análisis se empleó un Microscopio Raman Confocal de la firma francesa Horiba. Las imágenes y espectros se obtuvieron mediante el empleo de un microscopio marca OLYMPUS, modelo BX-43 y un espectrómetro modelo XploRa PLUS, se trabajó bajo las condiciones siguientes.

Tabla 1. Microscopia.

La microscopía	
Objetivos	5x,10x, 20x, 50x y 100x
Iluminación	Luz Incidente
Tipo de luz	Natural
La espectrometría	
Red	1200 líneas/mm
Filtro	25% y 100%
Rendija	100 µm
Orificio confocal	300 µm
LASER	532 nm y 785 nm
Rango de trabajo	60-1800 cm^{-1}
Tiempo de adquisición	2s
Número de acumulaciones	2

Las imágenes y espectros se procesaron mediante el software LabSpec 6. Para las identificaciones de fases se utilizó la información acumulada con el uso de esta técnica sobre la base de materiales conocidos, información suministrada por la IMA y los espectros de referencia del Proyecto RRUFF, de acceso libre en INTERNET. Cuando resultó necesario se utilizó el Software Crystal Sleuth también de acceso libre en INTERNET.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen algunos resultados que se han obtenido con la utilización del Microscopio Raman Confocal en la caracterización de minerales vinculados a la producción de Níquel, Cromo, Zinc, Plomo y Oro, lo que en algunos casos se complementa con la utilización del propio equipo en la caracterización de reactivos empleados en el procesamiento de estos minerales.

Extracción de Níquel

Entre las aéreas de aplicación de la MRC se encuentra la minería del Níquel. Es conocido que las principales fuentes de extracción del Níquel son las menas sulfurosas y las lateríticas (McRae, 2023). En el caso de los sulfuros su identificación en los minerales de partida es muy segura, reportándose espectros Raman muy bien definidos para sus diferentes variantes (La Fuente *et al*., 2015), la figura 1 muestra los espectros de la Pentlandita, la Heazlewoodita y la Gersdorfita, tres de los sulfuros de Níquel de más frecuente aparición en Cuba, en nuestro caso también se ha identificado un Sulfato de Níquel mediante el equipo, la Retgersita, lo que se muestra en la figura 2.

Respecto a las lateritas, que son las menas de Níquel de mayor interés económico en nuestro país, la MRC nos ha permitido el estudio de los principales Óxidos de Hierro y de las Serpentinas que resultan difíciles de diferenciar mediante otras técnicas (Petriglieri *et al*., 2015). La figura 3 presenta la identificación de tres Óxidos de Hierro y la figura 4 la identificación de tres Serpentinas, todos de la región de Moa en el oriente del país.

Además de los Óxidos de Hierro y las Serpentinas, que son los minerales predominantes en las muestras Lateríticas que se han investigado, se han identificado mediante la MRC otros minerales de interés en la región de Moa, como es el caso de la Asbolana $(Mn(O,OH)_2(Co,Ni,Mg,Ca)X(OH)_{2xn}H_2O)$ que es portadora de Níquel y Cobalto, y la Litioforita $((Al,Li)MnO_2(OH)_2)$ que contiene pequeñas cantidades de Litio. Estos dos minerales por lo general se encontraron en asociación.

La figura 5 ilustra la identificación de estos minerales en muestras de Moa.

Desde el punto de vista de los productos derivados del Níquel, se han realizado estudios de los Sulfatos de Níquel, permitiendo el equipo diferenciar entre ellos. La figura 6 ilustra el resultado de un trabajo donde se comprobó que un producto resultante

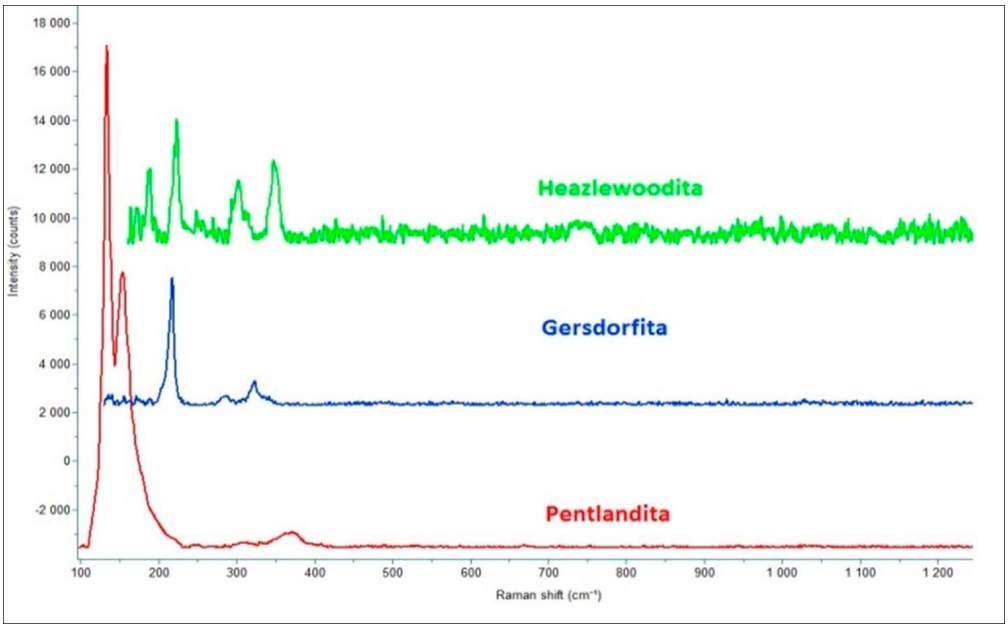


Figura 1. Espectros de la Pentlandita, Heazlewoodita y Gersdorfita, tres sulfuros de Níquel de frecuente aparición en Cuba.

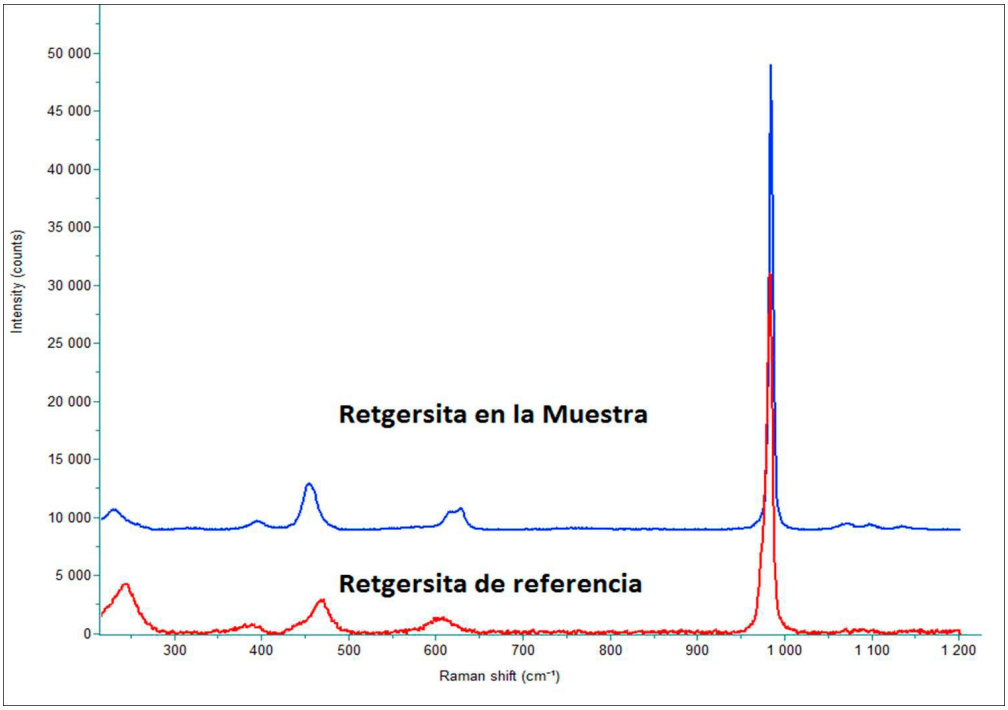


Figura 2. Identificación mediante el XploRA PLUS de una Retgersita de la parte central del país.

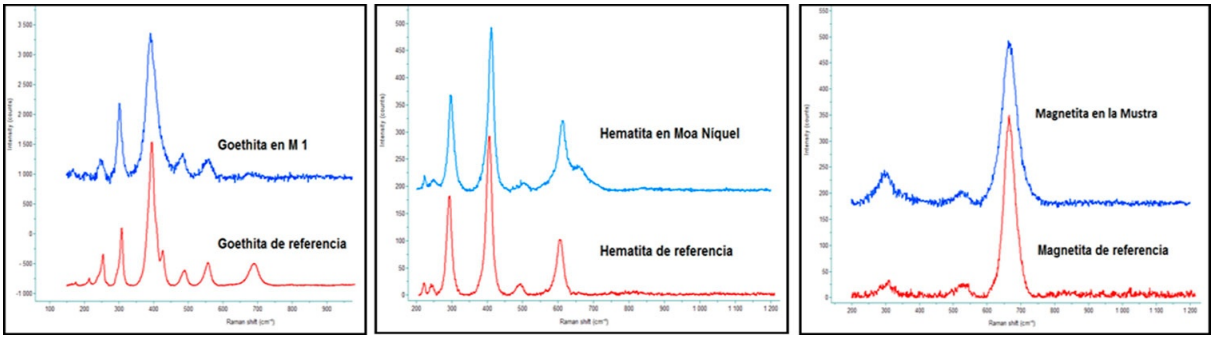


Figura 3. Identificación de Goethita, Hematita y Magnetita en la región de Moa, al oriente del país.

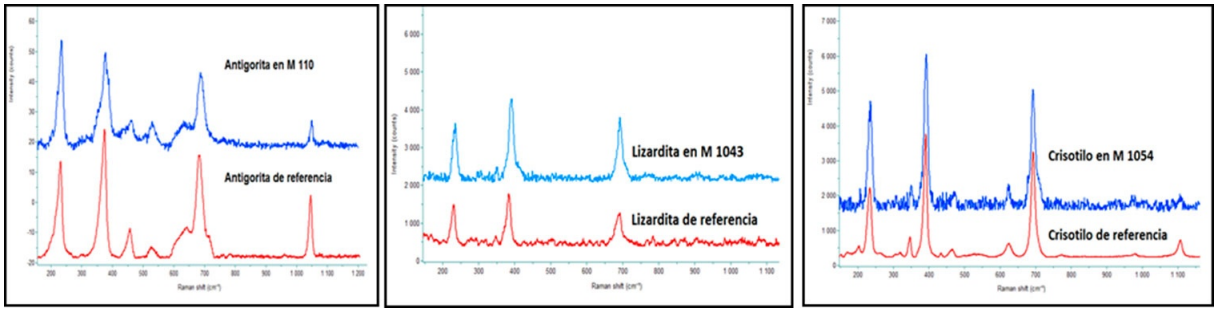


Figura 4. Identificación de Antigorita, Lizardita y Crisotilo en la región de Moa, al oriente del país.

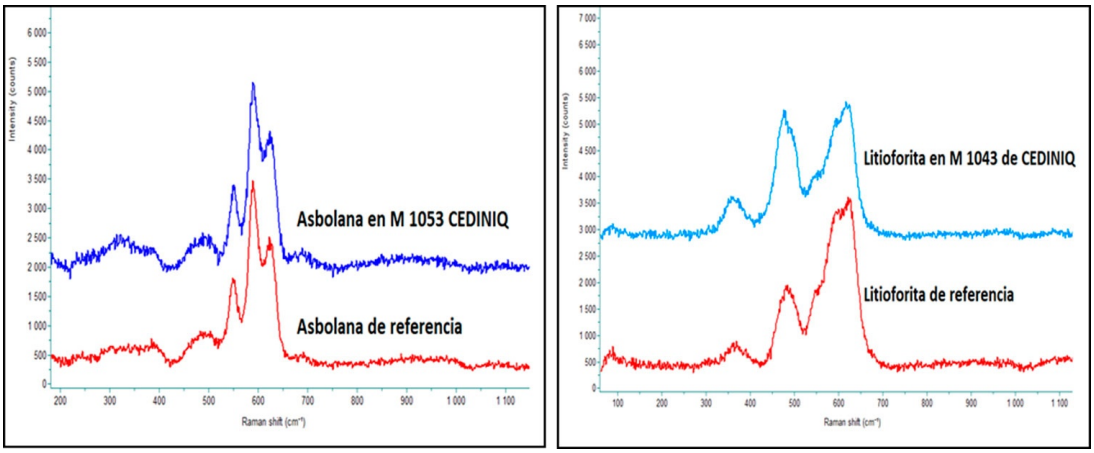


Figura 5. Identificación de Asbolana y Litioforita en la región de Moa, al oriente del país.

que se investigaba, se correspondía con un Sulfato Heptahidratado, el cual se diferenciaba claramente en los espectros Raman de otros Sulfatos como por ejemplo el monohidratado y otra variante estructural del heptahidratado.

La figura 6 corrobora lo señalado anteriormente, se aprecia que el espectro Raman obtenido a partir de la muestra investigada (Espectro "e"), se corresponde con una variedad del Sulfato de Níquel heptahidratado (Espectro "a"), siendo diferente a los tres espectros restantes, también correspondientes a Sulfatos de Níquel.

Extracción de Cromo

El estudio de minerales de Cromo mediante el MRC está referido en la literatura (Naveen *et al*., 2019) y han sido objeto de estudio varias regiones del país donde los contenidos de Cromitas son altos. En estos trabajos la Microscopía Raman Confocal ha hecho posible no solo identificar variantes de Cromitas, sino también acompañar el trabajo con la caracterización mineralógica completa de las muestras que han sido de interés. Entre los minerales que se han encontrado con mayor frecuencia asociados a los portadores de Cromo, se encuentran los Olivinos, sobre todo la Forsterita, y los Piroxenos, en particular la Augita y la Enstatita. La figura 7 ilustra la identificación en una muestra de Magnesiocromita, mientras que en la figura 8 se presenta la identificación de minerales acompañantes, en este caso la Forsterita, la Augita y la Enstatita.

Extracción de Zinc y Plomo

Los concentrados de Zinc y Plomo obtenidos a partir de la extracción minera han sido objeto de estudio en diferentes ocasiones con el uso del Microscopio Raman Confocal XploRA PLUS, labor que en algunos casos se ha complementado con el empleo de la Microscopía Electrónica de Barrido. En el caso particular de la Galena (PbS, ver por ejemplo Shapter *et al*., 2000), que es el principal portador de Plomo que se ha encontrado, el empleo del Microscopio Raman empleado ha sido particularmente ventajoso, ya que el pico más característico de la Galena se encuentra en los 126 cm^{1}, y sobre todo un pico de confirmación en 74 cm^{-1}. En los equipos que se comercializaban hace solo unos años, por lo general los picos por debajo de 200cm^{-1} no eran detectables, razón por la cual dichos picos no se encuentran disponibles en la mayoría de las Bases de Datos de espectros Raman. La figura 9 ilustra a la izquierda la presencia de Esfalerita (ZnS, cuya variabilidad se reporta por ejemplo por Birgaoanu *et al*., 2018) y de Galena en una muestra de concentrado vista al Microscopio Electrónico, a la derecha se presenta el espectro Raman de la Galena donde se destaca, mediante una línea de color verde, el número de onda por debajo del cual no era habitual hasta hace poco la detección de picos. La figura 10 presenta una identificación de Esfalerita realizada mediante el Microscopio Raman Confocal.

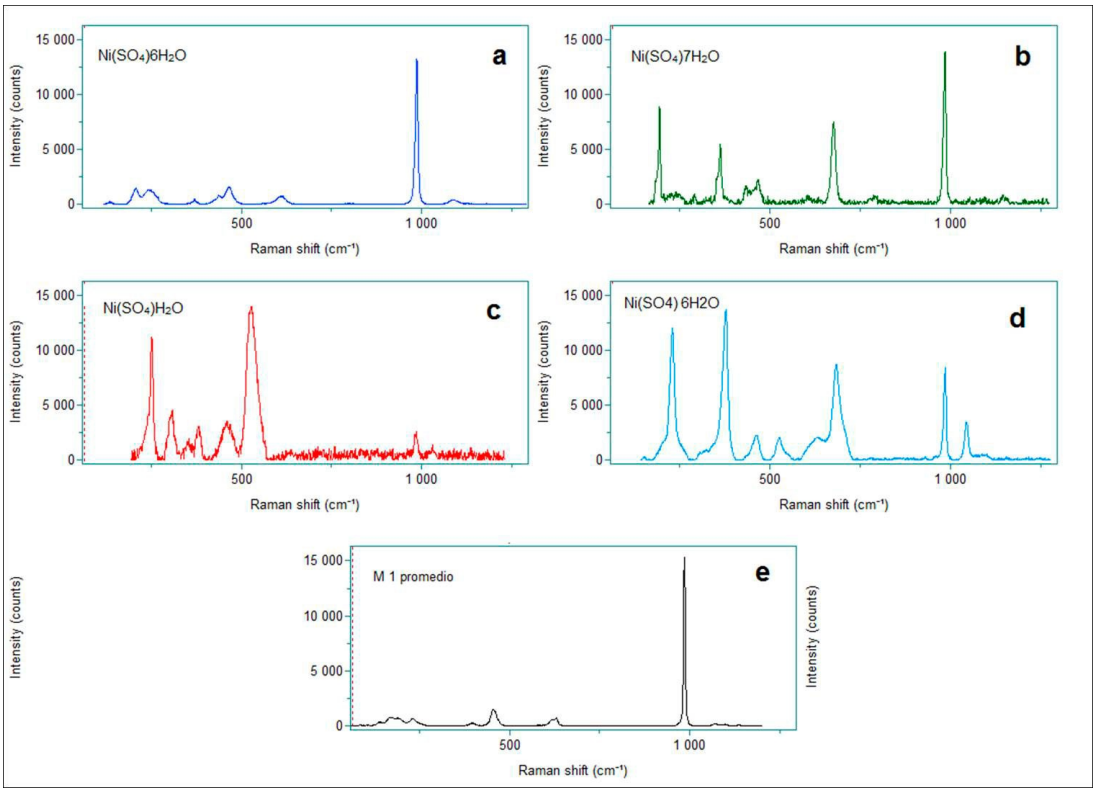


Figura 6. Identificación del producto de Níquel que se investiga (Espectro "e") como un Sulfato de Níquel Heptahidratado (Espectro "a"). Se aprecian las diferencias significativas entre el espectro Raman "e" y los espectros "b, c y d"

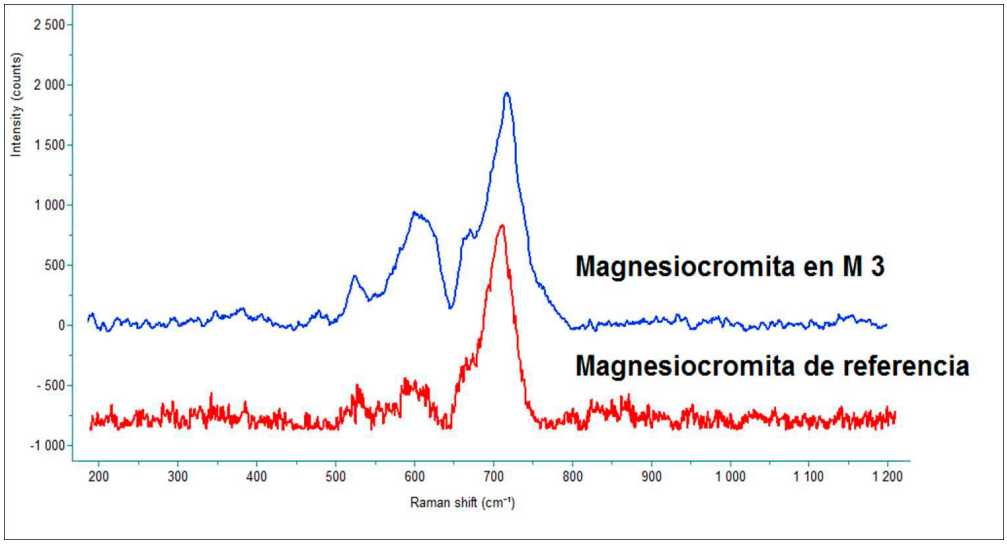


Figura 7. Identificación mediante el XploRA PLUS de una Magnesiocromita de la parte oriental del país.

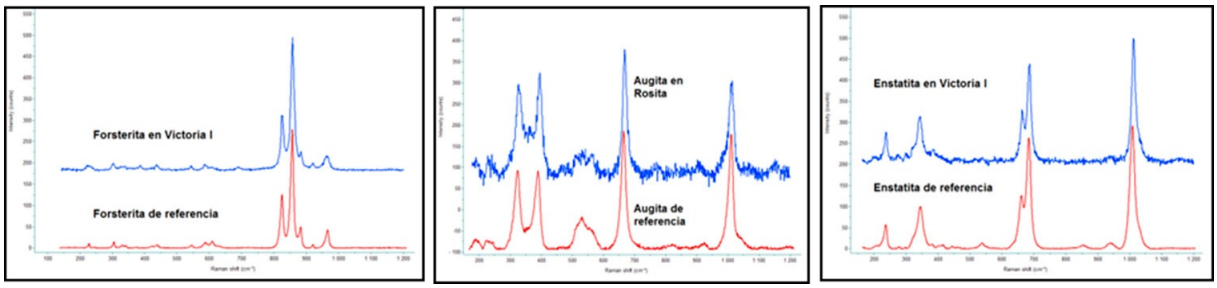


Figura 8. Identificación de Forsterita, Augita y Enstatita, que se encontraron frecuentemente en las menas de Cromo que se han investigado.

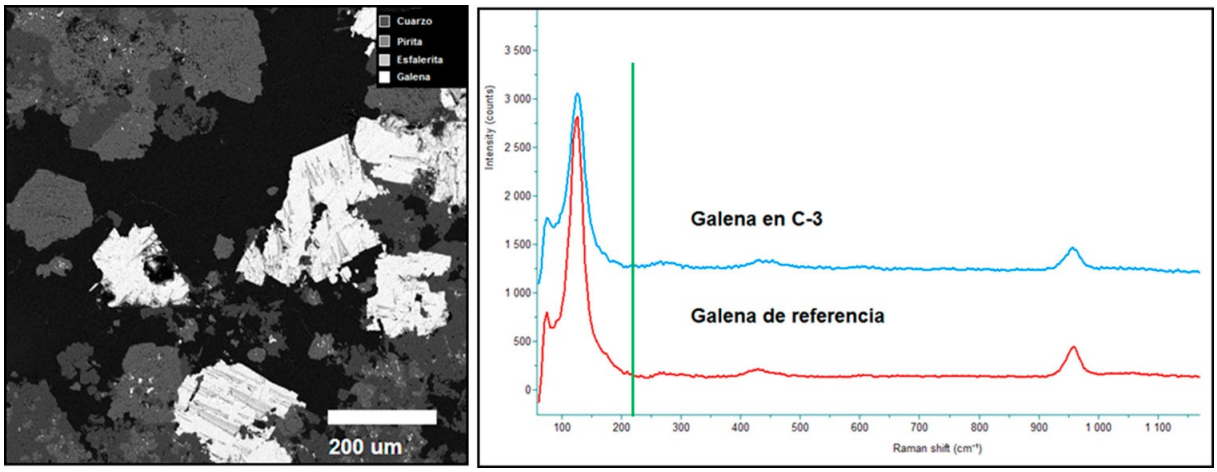


Figura 9. Se presenta a la izquierda una imagen de Microscopía Electrónica de Barrido donde se observan, en diferentes tonos de gris, la Galena y la Esfalerita que se encuentran acompañadas de Cuarzo y Pirita. A la derecha se presenta el espectro Raman que permitió la identificación de la Galena en la muestra. La línea de color verde en el espectro representa la "frontera" hasta la cual era posible detectar los picos en la muestra hasta hace poco tiempo, se observa que la información más importante para el caso de la Galena quedaba fuera del alcance de los equipos más antiguos.

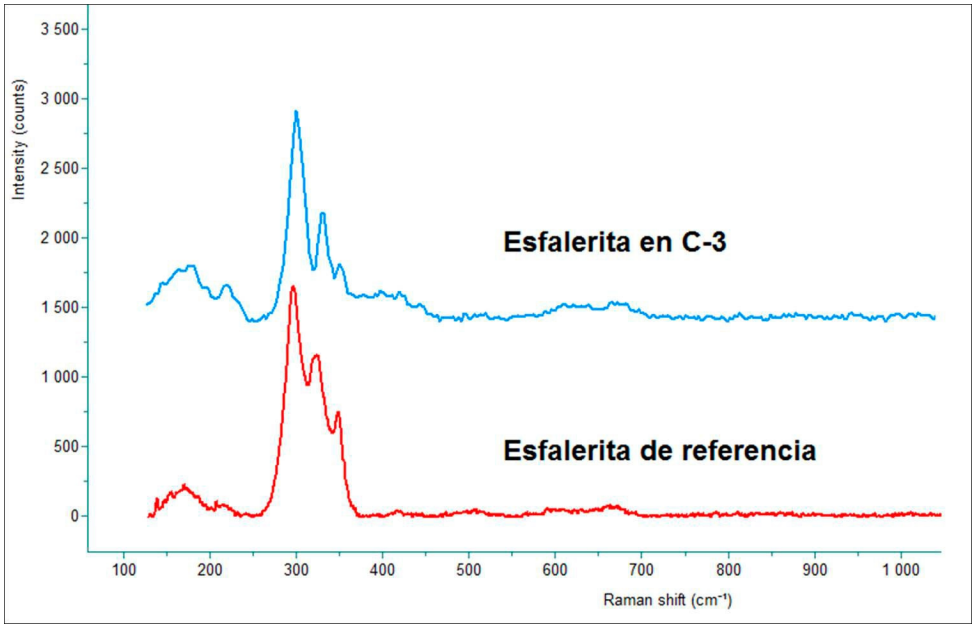


Figura 10. Identificación de Esfalerita en un concentrado de Zinc y Plomo, mediante el uso del Microscopio Raman Confocal.

Extracción de Oro

Respecto a la explotación del Oro, la MRC posee una gama amplia de aplicaciones, entre las que se encuentra la identificación de varios minerales portadores de Oro, así como de sus indicativos y asociados (La Fuente *et al*., 2015 y Maftei *et al*., 2020). También se usa con éxito en el control de reactivos empleados en plantas donde son procesados dichos minerales, un ejemplo de ello es la Cal, que interviene favoreciendo el proceso de lixiviación (Davidson y Sole, 2007). La Cal sin embargo presenta un ciclo de degradación por acción tanto del agua como del CO_2, lo que hace necesario contar con una técnica rápida y segura para establecer en dicho reactivo los contenidos de $CaO/Ca(OH)/CaCO_3$. Este ciclo puede ser seguido mediante la espectrometría Raman.

Otro ejemplo de la aplicabilidad del Microscopio Raman Confocal en el control de los reactivos empleados en las plantas de Oro es el del Carbón, la figura 11 presenta un estudio que se realizó con el equipo el cual permitió valorar la sustitución de un carbón por otro, atendiendo a su estructura química.

Respecto a la identificación propiamente del mineral de Oro mediante Microscopía Raman Confocal, durante mucho tiempo se viene manifestando que se trata de una técnica no idónea para la identificación de dicho mineral, lo que está sustentado desde el punto de vista teórico, no obstante, con la ampliación de la zona de análisis a la que ya hicimos referencia, abarcando números de onda cada vez más pequeños, se ponen de manifiesto picos que antes no se detectaban, por lo que es un tema en pleno estudio. La figura 12 muestra la detección de Oro

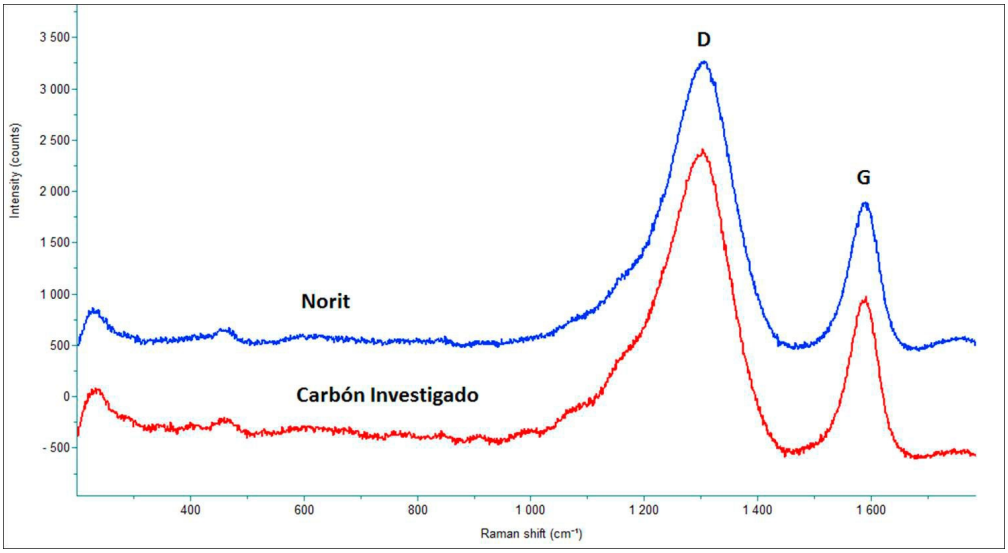


Figura 11. Comparación de los espectros Raman de un Carbón del tipo que se venía utilizándose en una planta de producción de Oro (NORIT), con otro que se valoraba la factibilidad de su empleo (Investigado). Se observa que ambos presentan similar proporción en los componentes de Desorden (D) y Grafítico (G).

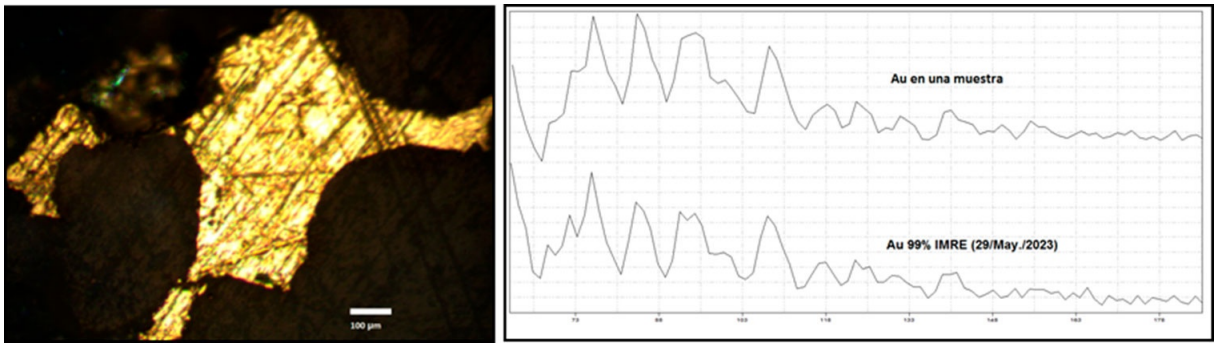


Figura 12. Se presenta a la izquierda una imagen de Microscopía Óptica donde se observa una partícula de Oro detectada en una muestra. A la derecha se presenta el espectro Raman en el que se observa la similitud entre la partícula investigada y una muestra de Oro de referencia. Este es un tema que se encuentra en investigación.

mediante el Microscopio del equipo, acompañada del espectro Raman de una partícula investigada en comparación con el obtenido para una muestra de referencia.

Extracción de otros minerales y valoración del Impacto Ambiental

Otros minerales también han sido objeto de estudio mediante el Microscopio Raman confocal, tal es el caso de los portadores de Tierras Raras, Granates, Turmalinas y Jade (en el caso de minerales con valor gemológico consultar por ejemplo (Lowry *et al*., 2009), y Zeolitas, Carbonatos, y Arcillas, por mencionar algunos, lo que da idea de las capacidades de este equipo en el estudio de los minerales de interés económico. Si bien estas identificaciones se han basado en el uso de la experiencia acumulada y de las Bases de Datos sobre minerales disponibles en Internet, también se viene trabajando en la creación de una Base propia de minerales cubanos, lo que ha mostrado ser de gran utilidad, ya que se cubre la zona del espectro que generalmente no está disponible en las Bases convencionales (zonas de bajos números de onda en el espectro) y además se tienen en cuenta particularidades genéticas de las diferentes regiones del país.

Desde el punto de vista del impacto ambiental de la industria minera, el XploRA PLUS también ha mostrado capacidades significativas. Tanto los minerales generadores de Asbestos (Lahondere et al., 2019) los portadores de metales pesados, así como los capaces de generar drenaje ácido entre otros, han sido objeto de estudio con este equipo.

La figura 13 ilustra la identificación mediante el Microscopio Raman Confocal modelo XploRA de una Monacita de Camagüey, que es un fosfato portador de Tierras Raras y de un Antimonio metálico de Isla de la Juventud, elemento que presenta propiedades toxicas.

CONCLUSIONES

1. El Microscopio Raman Confocal, por la rapidez con la que brinda los resultados, su carácter no destructivo y la capacidad de identificar

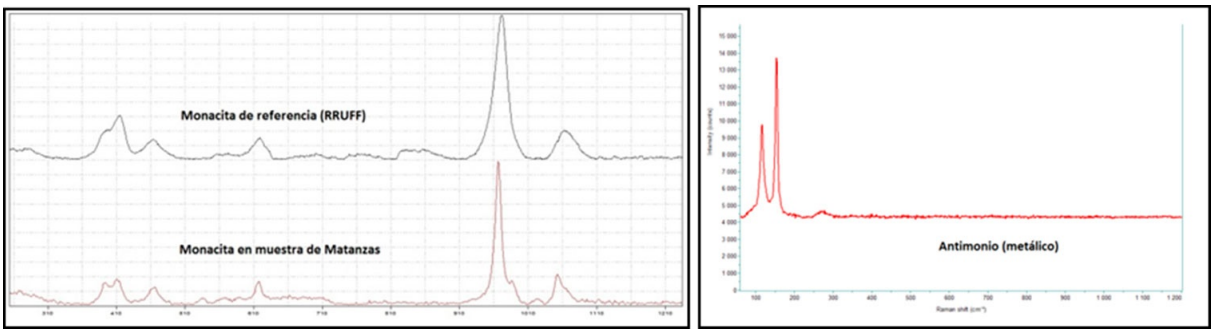


Figura 13. Se presenta a la izquierda la identificación de una Monacita y a la derecha la de una partícula de Antimonio metálico, todo mediante el empleo del Microscopio Raman Confocal modelo XploRA

y cuantificar varios miles de minerales, ha resultado una herramienta de suma utilidad en el estudio de minerales asociados a las producciones de Níquel, Oro y Cromo entre otras.

2. El empleo de esta técnica no se ha limitado a las producciones antes citadas, ya que también se ha utilizado en el análisis de Zeolitas, Carbonatos, Sulfuros, Arcillas, Asbestos y otros minerales de interés minero, geológico y con impacto ambiental, así como en la caracterización de reactivos utilizados en el procesamiento de diferentes minerales.

BIBLIOGRAFÍA

Birgaoanu D., Buzzatu, A. & G. Damian. 2018. The Fe Content in the sphalerites from the breiner-băiuț deposit. Rom. J. Mineral Deposits, 91, (1-2): 37-42.

Davidson R J. & Sole M. J. 2007. The major role played by calcium in gold plant circuits. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 107: 463-468.

La Fuente B., Downs, R. T., Yang H. & N. Stone.2015. The RRUFF project. Available: < http:/ www.rruff.info>, 'Consulted: January 12, 2024".

Lohondere D., Cagnard F., Wille G. & Duron, J. 2019. Naturally occurring asbestos in an alpine ophiolitic complex (northern Corsica, France). Environmental Earth Sciences 78(17).

Lowry S., Wieboldt D., Dalrymple D., Jasinevicius, R. & Downs, R. T. 2009. The Use of a Raman Spectral Database of Minerals for the Rapid Verification of Semiprecious Gemstones. Spectroscopy 24(4): 1-7.

Maftei A E., A. Bazatu, G. Damian, N. Buzgar, H. G. Dill & A. I. Apopei 2020 Micro-Raman—A Tool for the Heavy Mineral Analysis of Gold Placer-Type Deposits, Minerals, 10, 988.

McRae, M. 2023, Nickel Statistics & Information, Available: <http:/www.usgs.gov>, 'Consulted: January 9, 2024".

Naveen P, S. Sarkar, T. N. Kumar, D. Ray, S. Bhattacharya, A. D. Shukla, H. Moitra, A. Dagar, P. Chauhan, K. Sen & S. Das. 2019. Planetary and Space Science, 165, 1-9.

Petriglieri J R, E. Salvioli-Mariani, L. Mantovani & M. Tribaudino. 2015. Micro-Raman mapping of the polymorphs of serpentine, J. Raman Spectrosc, 46: 953-958.

Shapter J G, M. H. Brooker & W. M. Skinner. 2000. Observation of the oxidation of galena using Raman spectroscopy. International Journal of Mineral Processing 60, (3-4): 199-211.