

# Aplicación de la espectroscopia VNIR-SWIR a la prospección y explotación de yacimientos minerales

Mercedes Suárez

Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. 37008. Salamanca (España)

\* corresponding author: [msuarez@usal.es](mailto:msuarez@usal.es)

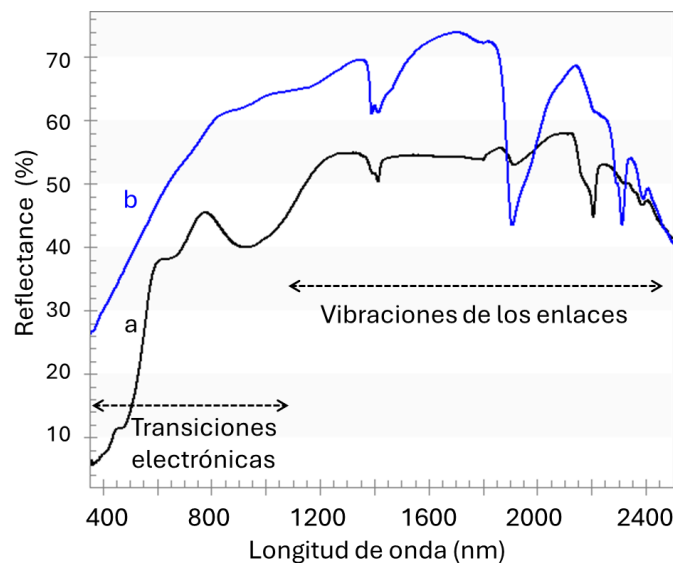
**Palabras Clave:** Espectroscopia VNIR-SWIR, Yacimientos minerales, Teledetección. **Key Words:** VNIR-SWIR spectroscopy, Ore deposits, Remote sensing.

La espectroscopía de reflectancia en el intervalo de longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano y de onda corta, también denominada espectrorradiometría VNIR-SWIR (de sus siglas en inglés), es una técnica de especial interés en geología y en astrogeología ya que es la base de los estudios de composición de superficies planetarias. Por otra parte, el gran desarrollo de los estudios espectroscópicos en estas longitudes de onda está relacionado con los estudios mediante teledetección, ya que la radiación solar reflejada por la superficie del terreno en este intervalo de longitudes de onda presenta rasgos discriminatorios de la composición mineral de una roca. Esta técnica se ha aplicado a la prospección de yacimientos minerales desde hace décadas, siendo pioneros trabajos como el de Goetz y Rowan (1981), en el que se usaron datos de espectrometría aerotransportada para cartografiar alteraciones hidrotermales en áreas mineras y estableciendo un vínculo claro entre firmas espectrales en el VNIR-SWIR y los minerales de alteración. A partir de ese momento, la espectroscopía de reflectancia VNIR-SWIR ha sido utilizada de manera relativamente frecuente en exploración minera ya que se trata de una técnica de bajo coste, rápida y no destructiva, que permite la adquisición y tratamiento de un elevado número de datos en poco tiempo. Sin embargo, es en los últimos años cuando la espectroscopía VNIR-SWIR ha suscitado un creciente interés gracias al desarrollo tecnológico de espectrorradiómetros portátiles y sensores proximales y remotos de gran resolución espectral.

De una manera muy sencilla, se puede decir que en un espectro de reflectancia se compara la cantidad de radiación electromagnética incidente y reflejada por una superficie, de manera que, si existe una diferencia entre ambos valores para una determinada longitud de onda, esa diferencia estará relacionada con la absorción de la energía correspondiente por los materiales que componen dicha superficie, y dará lugar a un rasgo de absorción en el espectro (Figura 1). Las absorciones que se producen en el intervalo de longitud de onda VNIR-SWIR, desde 450 nm hasta 2500 nm, son debidas a procesos de transiciones electrónicas en la corteza de átomos que pertenecen al grupo de los elementos de transición y tierras raras (en el visible) y a vibraciones de los enlaces en las estructuras cristalinas (en el infrarrojo cercano y de onda corta) (Hubbard and Crowley, 2005). Así pues, podemos obtener información sobre la composición química y la estructura, es decir podemos identificar la composición mineralógica. No obstante, no todos los minerales tienen una buena respuesta espectral en este intervalo de longitudes de onda, siendo idóneo para el estudio de minerales hidratados, en particular los filosilicatos, así como sulfatos y carbonatos entre otros, además de aquellos minerales que contengan átomos correspondientes a elementos de transición y tierras raras. Sin embargo, aún en el caso en el que minerales de interés económico no presenten rasgos característicos en ese intervalo de longitudes de onda, el uso de la espectroscopía VNIR-SWIR sigue siendo una herramienta ampliamente empleada ya que, frecuentemente, se utiliza la identificación de otras fases minerales como *proxy* (Tuşa et al., 2020). La identificación de los diferentes minerales formadores de rocas mediante esta técnica se basa en los trabajos de Hunt (1977), Hunt y Asley (1979) y Clark (1999). En muchos casos, la identificación de los minerales se realiza por comparación con bibliotecas espectrales (*Spectral Feature Fitting*), como la biblioteca espectral ASTER Spectral Library o las contenidas en el software de análisis de imágenes como ENVI. Por otra parte, en los últimos años las tareas de clasificación e interpretación se han visto beneficiadas por el uso de métodos de *machine learning* (Tuşa et al., 2020, Shirmard et al., 2022). No obstante, al utilizar bibliotecas espectrales hay que tener en cuenta que el espectro resultante de una mezcla de minerales puede no ser el resultado de la suma de los espectros individuales, ya que los límites de detección varían fuertemente de unos minerales a otros y dependen de cuáles sean los otros minerales con los que aparecen (Santamaría, et al., 2024 y Santamaría y Suárez, 2024).

Además del análisis de los rasgos de absorción, su posición, anchura, posible presencia de hombros, la reflectancia global, la obtención de índices de absorción como la relación de intensidad entre determinadas bandas, etc... para la

interpretación y el uso de los datos de reflectancia se pueden realizar distintos tratamientos como por ejemplo: a) la corrección de ruido, b) el *continuum removal*, que normaliza los espectros un *continuum* ajustado resaltando las bandas de absorción específicas de los minerales (Santamaría et al., 2024), c) el ajuste de polinomios, que después de ajustar un polinomio al espectro divide el espectro original por el ajuste, de manera que se facilita la comparación entre espectros, d) la obtención de la primera y segunda derivada, que normalizan los espectros y permiten resaltar pequeñas diferencias en la curvatura de los rasgos de absorción, siendo especialmente útiles cuando se solapan bandas de absorción de distintos minerales (Cudahy y Caccetta, 2007), f) tratamientos estadísticos como el análisis de componentes principales, regresión de mínimos cuadrados parciales, análisis discriminante lineal, entre otros, utilizados para reducir la dimensionalidad de los datos y resaltar las variaciones espectrales más significativas, ayudando a discriminar clases de minerales y detectar patrones en grandes conjuntos de muestras (Tangestani, 2006; Pour y Hashim, 2012).



**Figura 1.** Espectros de reflectancia. a) muestra con importante contenido en óxidos de Fe (goethita y hematites). b) muestra con ausencia de rasgos en el visible y marcadas bandas de absorción a  $\sim 1400$  y  $\sim 1900$  nm indicando la presencia de un mineral hidratado (esmeclita trioctaédrica).

Los espectros de reflectancia pueden ser obtenidos de manera puntual sobre una superficie, bien a corta distancia o mediante sonda de contacto, o de manera remota cuando el sensor está embarcado en aviones o satélites, si bien en los últimos años se ha incorporado una nueva escala de trabajo, denominada teledetección proximal, en la que se utilizan cámaras sobre soportes o drones (Khan et al., 2023, Schodlok et al., 2024) que posibilitan una gran resolución espacial. Por otra parte, también en los últimos años, han comenzado a aparecer trabajos en los que se utilizan sensores proximales hiperespectrales para el monitoreo de testigos de sondeo realizando identificaciones mineralógicas con gran detalle, siendo precursor el estudio realizado por Haest et al., (2012), entre otros. Con respecto a la resolución espectral, tanto los espectrorradiómetros de campo como las cámaras y los sensores aerotransportados pueden ser: 1) multispectrales: obtienen datos de un número de longitudes de onda determinado, como por ejemplo el conocido Thematic Mapper de Landsat que obtiene datos de 7 longitudes de onda, 4 en el visible y 3 en el infrarrojo, y 2) hiperespectrales: cuando obtienen datos de todas las longitudes de onda correspondientes al intervalo VNIR-SWIR, con resoluciones espectrales que pueden ser inferiores a 10 nm.

Principalmente, hay tres campos de estudio en geología en los que se realizan trabajos de identificación mineral mediante espectroscopía VNIR-SWIR: suelos, exploración extraplanetaria y prospección y estudio de yacimientos minerales. Con respecto a los yacimientos minerales, a principios de la década de los 90 del siglo pasado, compañías mineras comenzaron a usar espectrorradiómetros portátiles en la exploración de yacimientos epitermales de Au y de pórfidos cupríferos, particularmente para la detección de minerales de alteración, como la caolinita, alunita y sericita. A partir de este momento son cada vez más frecuentes los trabajos en los que datos puntuales o remotos se utilizan en prospección y exploración de yacimientos tanto de menas metálicas como de minerales industriales de manera que, en los últimos años, son abundantes los trabajos en los que esta técnica se ha utilizado para cartografiar o caracterizar yacimientos (Peyghambari y Zhang, 2021) y para identificar minerales de la ganga y los halos de alteración asociados a distintas menas en las fases de exploración, (Crosta et al., 2003, Di Tomasso y Rubinstein,

2007, Rowan et al., 2006,...). Actualmente, el uso de teledetección proximal mediante cámaras para la adquisición de imágenes de alta resolución espacial y espectral combinado con métodos de *machine learning* posibilita el análisis mineralógico de grandes cantidades de testigos de sondeo de manera rápida y no destructiva.

## REFERENCIAS

- Clark, R.N. (1999). Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: Rencz AN ed Remote sensing for the Earth sciences, Manual of remote sensing, Volume 3 third edition: New York. John Wiley and Sons, Inc, New York, 3-58.
- Crosta, A.P., De Souza Filho, C.R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *Int. J. of Remote Sens.*, **24**(21), 4233-4240.
- Cudahy, T. J., & Caccetta, M. (2007). Mapping hydrothermal alteration using hyperspectral VNIR-SWIR-TIR data. *Econ. Geol.*, Vol. 102.
- Di Tomasso, I., Rubinstein, N. (2007). Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geol. Rev.*, **32**, 275-290.
- Goetz, A. F. H., and Rowan, L. C. (1981). Mineral identification from orbit: Initial results from the Shuttle Multispectral Infrared Radiometer. *Science*, **211**(4484), 827-829.
- Haest, M., Cudahy, T., Laukamp, C., Gregory, S. (2012). Quantitative Mineralogy from Infrared Spectroscopic Data. I. Validation of Mineral Abundance and Composition Scripts at the Rocklea Channel Iron Deposit in Western Australia. *Econ. Geol.*, **107** (2): 209-228.
- Hubbard, B.E. and Crowley, J.K., (2005). Mineral mapping on the Chilean–bolivian Altiplano using co-orbital ALI, ASTER and Hyperion imagery: data dimensionality issues and solutions. *Remote Sens. Environ.*, **99** (1), 173-186.
- Hunt, G. (1977). Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* **42**, 501–513
- Hunt, G.R., Ashley, P. (1979). Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Econ. Geol.* **74**, 1613-1629.
- Khan, A., Ali, M., Khan, S., Ullah, Z., Faisal, S., Ahmad, L. (2023). An integrated approach for rapid exploration of carbonatites and related mineral resources. *Resour. Geol.*, **73**, e12321.
- Peyghambari, S., Zhang, Y. (2021). Hyperspectral remote sensing in lithological mapping, mineral exploration, and environmental geology: An updated review. *J. Appl. Remote Sens.*, **15**(3), 031501.
- Pour, A. B., Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geol. Revi.*, **44**, 1-9.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G., Mars, J.C. (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sens.f Environ.* **104**(1), 74-87.
- Santamaría, A., García-Romero, E, Suárez, M. (2024). Detection limits of kaolinities and some common minerals in binary mixtures by short-wave infrared spectroscopy. *Appl. Clay Sci.* **250**, 107269.
- Santamaría, A., Suárez, M. (2024). Limits for the Identification of Smectites Mixed with Common Minerals Based on Short-Wave Infrared Spectroscopy. *Minerals*, **14**(11), 1098.
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Müller, R.D., Chandra, R. (2022). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *Remote Sens. Environ.*, **268**, 112750.
- Schodlok, M., Frei, M., Hahne, K., Neugschwentner, B. (2024). UAV based hyperspectral mapping of a magnesite deposit in the Hochfilzen region, Austria, International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2110-2112.
- Tangestani, M. H. (2006). Evaluation of the efficiency of Principal Component Analysis (PCA) technique in enhancing spectral anomalies related to hydrothermal alterations. *Int. J. Remote Sens.*, **27**(17), 3647-3654
- Tuşa, L., Kern, M., Khodadadzadeh, M., Blannin, R., Gloaguen, R., Gutzmer, J. (2020) Evaluating the performance of hyperspectral short-wave infrared sensors for the pre-sorting of complex ores using machine learning methods *Miner. Eng.*, **146**, 106150.