



Análisis espectral y petrográfico del Complejo Volcánico Sierra de San Miguelito, S.L.P. México

Rafael GAYTAN-MARTÍNEZ¹; Cristina NOYOLA-MEDRANO¹ y Marco Antonio ROJAS-BELTRÁN²

Abstract: *SPECTRAL AND PETROGRAPHIC ANALYSIS OF THE VOLCANIC COMPLEX SIERRA DE SAN MIGUELITO, S.L.P. MEXICO.* This paper presents the analysis of spectroradiometric and petrographic data from lithological units of the Sierra de San Miguelito Volcanic Complex (SSMVC), located in the central region of the State of San Luis Potosí, Mexico. The CVSSM consists of ten felsic volcanic units of the Oligocene with variations in the degree of alteration of silicification, argilization, and oxidation. The lithological units were grouped into five classes: rhyolite, rhyodacite, latite, trachyte and basalt. The spectral signatures were recorded using a hyperspectral spectroradiometer Apogee model UV-NIR PS-300. The obtaining of spectral signatures was for each outcrop in the field and on hand samples of rock in the laboratory. The protocol of the spectral sampling includes three records in each point of the field, as well as, three records of each sample in the laboratory. The data reported is the spectral signature average (field and laboratory) from the fresh and the altered rock. Also, for five representative samples of each kind of lithology, a petrographic analysis was performed to establish the mineralogy and the textural relationships of the SSMVC rocks. The results show that the spectral signatures of the rhyolites, trachytes, and rhyodacites are very similar. The three kinds of rock have an ascending pattern until 600 nm, and a reflectivity peak is evident at the 750 nm. In addition, in the rhyolite unit is observed a stable plateau at 900 nm. In the field and laboratory signatures, the latite shows high values of reflectivity, but at 500 nm the spectral curves of the altered and fresh rock are intercepted by changing upside down their percentages of reflectivity. The basalt presents the values of reflectivity lowest in the entire sequence volcanic. The records of spectral signatures of the altered rock reveal that the argilization displays values of reflectivity that varies from 40 % to > 100 %. The oxidation shows two peaks of reflectivity, one at 600 nm and another at 700 nm, generating a distinctive pattern between the fresh and the altered rock. The silicification is commonly associated with oxidation, for that reason, it was not possible to separate its spectral response.

Resumen: Este trabajo presenta el análisis espectral y petrográfico de las unidades litológicas del Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), ubicado en la región central del Estado de San Luis Potosí, México. El CVSSM consta de diez unidades volcánicas de roca félsica del Oligoceno con variaciones en el grado de silicificación, argilización y oxidación. Las unidades fueron agrupadas en 5 clases de litología: riolita, riodacita, latita, traquita y basalto. El registro de firmas espectrales se hizo con un espectrorradiómetro hiperspectral Apogee UV-NIR PS-300. Las firmas espectrales se obtuvieron de cada afloramiento visitado en campo y en laboratorio a partir de muestras de mano. El protocolo del muestreo espectral incluye tres registros en cada punto de campo y en el laboratorio. El dato reportado en este trabajo, es la firma promedio tanto de la roca sana como de la roca alterada y/o intemperizada. Adicionalmente, se realizó el análisis petrográfico de 5 muestras representativas de cada clase de litología para establecer la mineralogía y las relaciones texturales de las rocas del CVSSM. Los resultados muestran

¹) Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Dirección Regional Centro Norte. Coordinación Estatal San Luis Potosí. Av. Venustiano Carranza # 1138, Barrio de Tequisquiapan, CP 78250, San Luis Potosí, SLP. México. correo electrónico: e-mail: rafa.gaytan@hotmail.com

²) Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Área Civil. Programa de Ingeniería en Geoinformática. Av. Dr. Manuel Nava # 8, San Luis Potosí, SLP. México. correo electrónico: e-mail: cristina.noyola@uaslp.mx

²) Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Ingeniería. Área Ciencias de la Tierra. Programa de Ingeniería en Geología. Av. Dr. Manuel Nava N° 8, Zona Universitaria Poniente, CP 78290, San Luis Potosí, SLP. e-mail: marco.beltran@uaslp.mx

que las firmas espectrales de las riolitas, riocitas y traquitas son muy similares. Los tres tipos de roca muestran un patrón ascendente hasta los 600 nm y un pico de reflectividad hacia los 750 nm. Además, en la riolita se observa una meseta estable hasta los 900 nm. En las firmas de campo y laboratorio de la latita se observan valores altos de reflectividad pero, hacia los 500 nm, las curvas espectrales de la roca intemperizada y fresca se cruzan, invirtiendo sus porcentajes de reflectividad. El basalto presenta los valores de reflectividad más bajos de toda la secuencia volcánica. Los registros de firmas espectrales de la alteración permiten constatar que la argilización muestra valores de reflectividad que varían de 40 % hasta > 100 %. La oxidación muestra dos picos de reflectividad, uno a los 600 nm y otro a los 700 nm, generando un patrón distintivo entre la roca sana y la alteración. La silicificación comúnmente viene asociada a la oxidación, por esa razón no se logró separar su respuesta espectral.

Palabras clave: Firma espectral. Petrografía. Espectrorradiómetro. Litología. Alteración. Sierra San Miguelito.

Key words: Spectral signature. Petrography. Spectroradiometer. Lithology. Alteration. Sierra San Miguelito.

Introducción

El Complejo Volcánico de la Sierra de San Miguelito (CVSSM), forma una extensa sierra en los bordes Sur, Oeste y Noroeste de la ciudad de San Luis Potosí, en la parte central de México. El CVSSM, comenzó a ser estudiado a fines de los años 70's desde un enfoque de cartografía geológica, la cual se sintetiza en el trabajo de Labarthe-Hernández *et al.* (1982). En los 90's existen varios trabajos del CVSSM que abordan aspectos estructurales, tectónicos y volcanológicos (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992; 1993; 1994). Posteriormente, a partir del año 2000, los estudios se han enfocado en temáticas sobre petrogénesis, geoquímica y tectónica-estructural, para comprender las relaciones de origen, edad y mecanismos de emplazamiento de las rocas volcánicas del CVSSM (Xu *et al.*, 2004; 2012; Torres-Hernández *et al.*, 2006; Rodríguez-Ríos y Torres-Aguilera, 2009; Tristán-González *et al.*, 2009; Aguillón-Robles *et al.*, 2012; 2014). Sin embargo, a pesar de los numerosos estudios cartográficos y geológicos sobre el CVSSM, hasta el momento, solo se ha mencionado someramente la parte relacionada a la alteración de las rocas volcánicas de esta región (Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992; 1993; 1994). Es por eso que en este trabajo se profundiza sobre el conocimiento de las distintas alteraciones en las rocas volcánicas, a través del uso de técnicas de la percepción remota, la espectrorradiometría y la petrografía. El uso de imágenes de satélite para realizar car-

tografía geológica se comenzó a implementar entre las décadas de los 70's y 80's con el sensor Landsat MSS y Landsat TM (Rowan *et al.*, 1977; Srinivasan *et al.*, 1980; Yuan *et al.*, 1998), y a partir de entonces se han mejorado las resoluciones espaciales, espectrales y radiométricas de las generaciones más recientes de Landsat que incluyen a Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI, para realizar cartografía litológica y estructural (Abrahms *et al.*, 1988; Ruiz-Armenta y Prol-Ledesma, 1998; Noyola-Medrano *et al.*, 2005). Sin embargo a principios del siglo XXI, el lanzamiento del sensor ASTER, permite aumentar la resolución espacial y espectral y con ello aumentan las posibilidades de cartografiar diferentes tipos de litológica, y de separar roca fresca de roca alterada, convirtiéndose en una de las principales aplicaciones de la percepción remota en materia de geología (Rowan y Mars, 2003; Ninomiya *et al.*, 2005; Mars y Rowan, 2010; Van der Meer *et al.*, 2012). A partir de mediados de la primer década del nuevo milenio, el uso de espectroradiómetros portátiles, amplía las posibilidades de generar datos del comportamiento espectral de las rocas insitu y en laboratorio, lo que permite mejorar sustancialmente la calidad en la cartografía, en particular para identificar tipos de alteración hidrotermal en zonas con pocos estudios o de difícil acceso (Di Tomasso y Rubinstein, 2007; Baldrige *et al.*, 2009; Brandmeier, *et al.*, 2013). Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo es registrar las firmas espectrales de las rocas del CVSSM, así como realizar el análisis petrográfico de las

mismas, para identificar y separar la roca fresca de aquella que está alterada.

Localización

La Sierra de San Miguelito se localiza en la parte central de México, hacia el borde occidental del Estado de San Luis Potosí (figura 1). Fisiográficamente, el CVSSM pertenece a la Provincia de la Mesa Central (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005) y geológicamente forma parte de la Provincia de la Sierra Madre Occidental, que se caracteriza por la presencia de un voluminoso volcanismo félsico de edad Oligoceno, que va de los 32 a los 27 Ma. (Ferrari *et al.*, 2005).

Geología

EL CVSSM consta de diez unidades de roca, las cuales, de la más antigua a la más reciente son

(figura 2): 1) Ignimbrita Santa María del Oligoceno temprano, 2) Latita Portezuelo cuya edad es de alrededor de 31 ± 0.7 Ma por el método de K/Ar, 3) Riolita San Miguelito con una edad de 30.0 ± 1.5 Ma, 4) Riodacita Barbechos cuya edad se sitúa entre la edad de la Riolita San Miguelito y la de la Ignimbrita Cantera, 5) Ignimbrita Cantera cuya edad obtenida por K/Ar es de 29.0 ± 1.5 Ma, 6) Riolita El Zapote con una edad de 29.2 ± 0.8 , 7) Ignimbrita Panalillo Inferior con una edad de alrededor de 28Ma, 8) Ignimbrita Panalillo Superior cuya edad registrada es 26.8 ± 1.3 , 9) Basalto Cabras con una edad de 21.5 ± 0.3 Ma y 10) Traquita Los Castillo con una edad de 20.5 ± 0.5 Ma (Labarthe-Hernández *et al.*, 1982; Tristán-González *et al.*, 2009; López-Loera y Tristán-González, 2013). Para desarrollar este trabajo, se agruparon las diez unidades estratigráficas en 5 unidades litológicas, con el fin de simplificar las

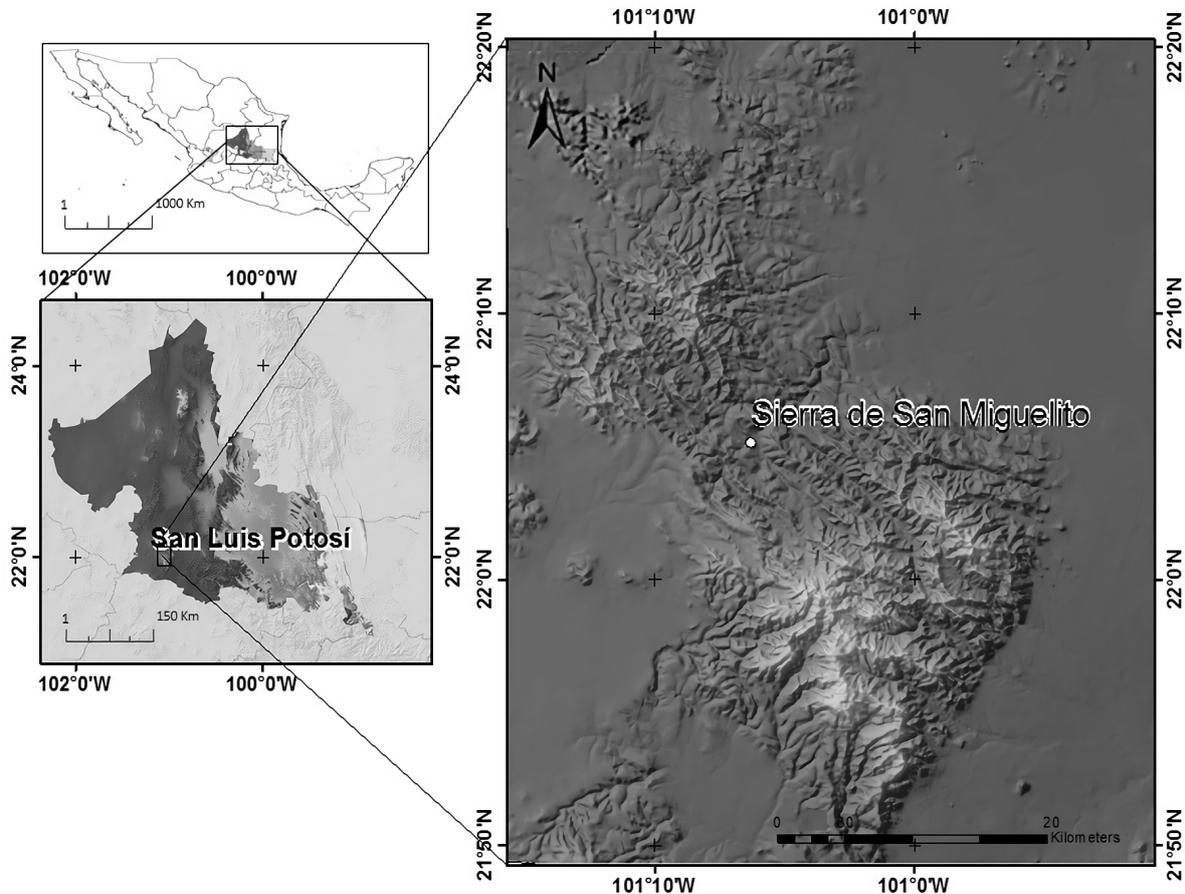


Figura 1. Mapa de localización de la Sierra de San Miguelito, S.L.P. / Figure 1. Location map of Sierra de San Miguelito, S.L.P.

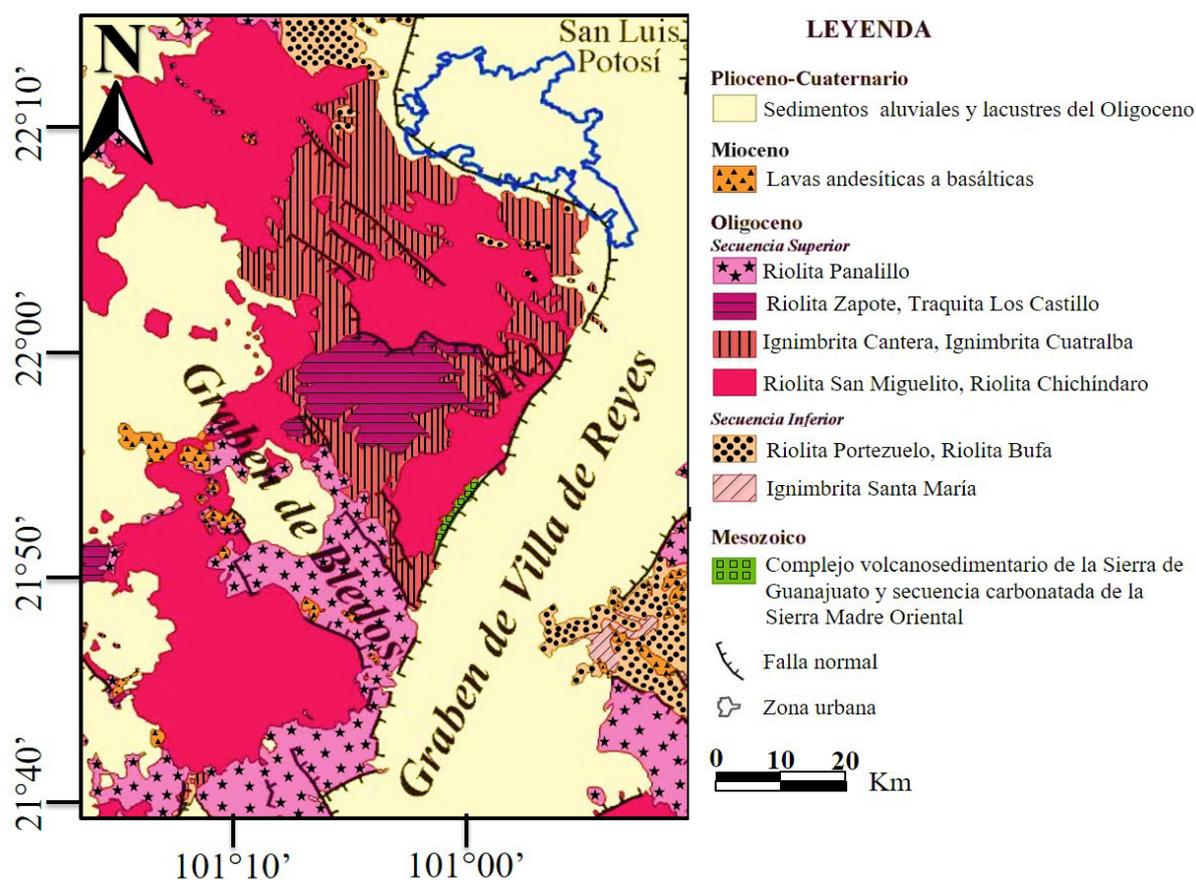


Figura 1. Mapa geológico de la región de estudio. (Modificado de Labarthe-Hernández *et al.*, 1982). / **Figure 1.** Geologic map of the study region. (Modified from Labarthe-Hernández *et al.*, 1982).

clasificaciones para separar roca sana de roca alterada, porque en las imágenes satelitales lo que se registra son los cambios en composición y no los cambios de edad geológica (Jensen, 2007). Entonces, de acuerdo a su composición las 5 unidades litológicas resultantes son: a) Riolitas, que consisten de flujos de lava, brechas, tobas e ignimbritas, con colores que varían del gris rosáceo a café grisáceo, de estructura masiva, columnar, en bolas y de textura afanítica-porfírica. b) Riodacitas, formadas por flujos de lava de color gris rosáceo a café claro, de estructura masiva y textura porfírica-afanítica. c) Latitas, que consisten de flujos de lava, de color gris a café grisáceo, de estructura deleznable y textura porfírica. d) Traquitas, formadas por flujos de lava, de color café a gris oscuro; de estructura masiva y textura afanítica-porfírica. e) Basalto, de color negro, vesicular o con estructuras amigdaloides y textura afanítica.

Material y métodos

Para este trabajo se utilizó un espectro-radiómetro hiperspectral Apogee UV-NIR PS300, con un rango de longitud de onda de 250 nm a 1100 nm y una PC portátil para el almacenamiento de información de firmas espectrales. Para el registro de las firmas en el terreno, se siguieron las recomendaciones definidas por McCoy (2005) y se establecieron dos protocolos:

- 1) Para el registro de firmas espectrales en campo se tomaron en cuenta aspectos como: hora de registro de la firma espectral, altura solar, orientación del operador respecto al sol, coordenadas del punto (GPS), orientación de la roca, etc. Se trató de evitar en lo posible zonas con sombras, días nublados, el uso de ropa en colores blanco o muy claros que pudieran afectar el registro de la firma espectral (Cano-Mar-

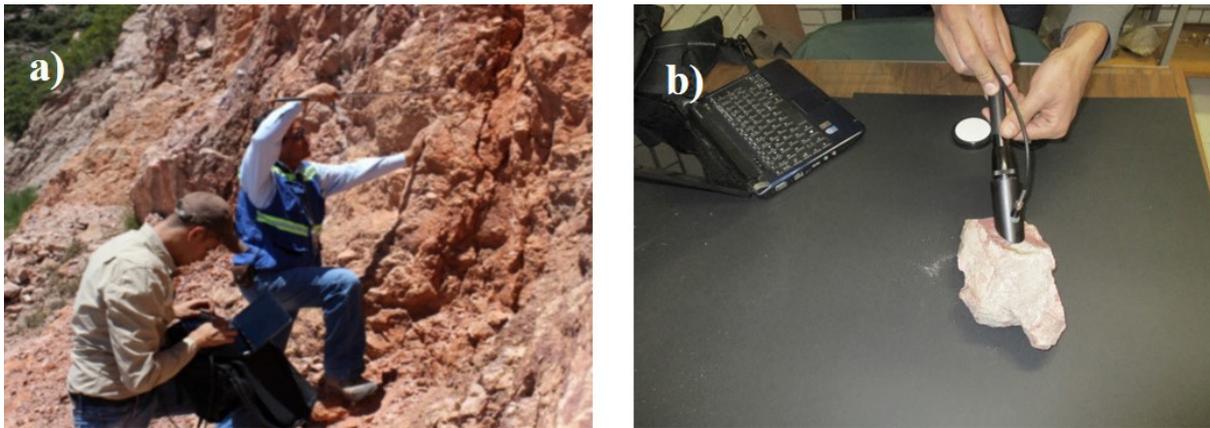


Figura 3. Registro de firmas espectrales: **A)** En campo. La unidad cartografiada en este caso es una riolita con fuerte oxidación; **B)** En laboratorio. Muestra de la unidad de riolita con oxidación. / **Figure 3.** Register of spectral signatures: **A)** In the field. The unit geologic mapped, in this case, is a rhyolite with high oxidation; **B)** In the laboratory. Sample of the geologic unit of rhyolite with oxidation.

tín, 2009). Para el registro de firmas espectrales en campo, primero se configuró el equipo que consistió en calibrar a partir de un spectralon o blanco de referencia (reflectividad 100 %) y el negro de referencia (línea base 0% de reflectividad). Se estableció un tiempo de integración de 12 milisegundos y se registraron tres escaneos por afloramiento, para obtener una medición promedio, con esto se pretende aumentar la precisión y reducir el error aleatorio (Milton *et al.*, 2009). El horario para el registro de las firmas fue de las 11 am a las 3 pm, que corresponden a las horas centrales del día, cuando el sol se encuentra en la posición al cenit y/o cercano al mismo, lo que conlleva que el ángulo de incidencia sea mayor a 30° (Cano-Martín, 2009).

El registro de firmas espectrales en el terreno se realizó en días de escasa o nula nubosidad (figura 3a), porque las condiciones atmosféricas pueden afectar a la respuesta espectral (Cano-Martín, 2009). Además de registrar la firma, en cada afloramiento visitado se tomó una muestra de mano, que se depositó en una bolsa de plástico para protegerla de contaminación. La muestra de mano se utilizó para obtener la firma espectral de laboratorio bajo condiciones controladas, así como, el estudio petrográfico de la unidad muestreada.

2) En el protocolo utilizado para el laboratorio, se trabajó con una sonda de reflectancia que consiste en una lámpara halógena que guarda una geometría de energía incidente a 45° con

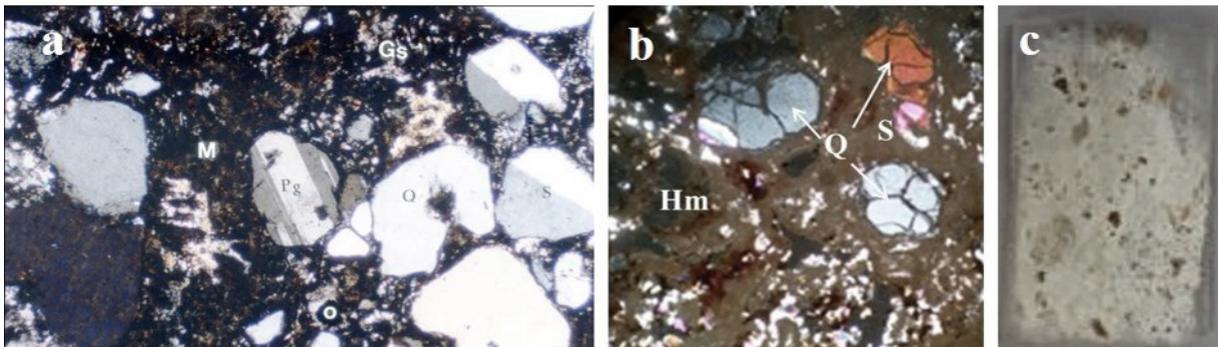


Figura 4. Fotografías de microscopio con nícoles cruzados y aumento de 5x en donde se observa: **A)** Lava riolítica, con textura porfírica, mostrando fenocristales de cuarzo (Q), sanidino (S), plagioclase (Pg) y algunos minerales opacos (O), en una matriz de ceniza (M) y microlitos de plagioclase (Gs). **B)** Lava riolítica con fuerte alteración por oxidación en la matriz; el vidrio volcánico se encuentra completamente hematizado (Hm). La textura porfírica está indicada por la presencia de fenocristales de cuarzo (Q), y sanidino (S). **C)** Lámina de riolita argilizada (tamaño es de 4.6 X 2.7 cm). / **Figure 4.** Microscope photos with crossed Nicols and a zoom of 5x. **A)** Rhyolitic lava with porphyritic texture showing phenocrysts of quartz (Q), sanidine (S), plagioclase (Pg) and opaque minerals (O) within of an ash matrix (M) and microlites of plagioclase (Gs). **B)** Rhyolitic lava packed in a matrix with a significant alteration of oxidation. The volcanic glass is completely hematized (Hm). The presence of phenocrysts of quartz (Q) and sanidine (S) indicate a porphyritic texture. **C)** A plate of argillized rhyolite (size of 4.6 x 2.7 cm).

respecto al nadir y la muestra se colocó en una base negra para evitar que el entorno del laboratorio influya sobre la respuesta espectral (figura 3b). Es importante mencionar que, el lugar donde se registren las firmas espectrales de laboratorio sea en una habitación oscura o con muy poca iluminación. El equipo fue configurado de la misma manera que en campo y también se obtuvieron tres escaneos de cada muestra. Se verificaron 50 puntos distribuidos en el CVSSM y se tomaron 25 muestras para su análisis espectral en laboratorio. Se seleccionaron cinco muestras para realizar láminas delgadas de cada grupo litológico. Las láminas delgadas se observaron en un microscopio petrográfico marca Olympus, modelo BS40X, con resoluciones a 4x, 10x y 20x. La descripción se realizó siguiendo la nomenclatura de Mackenzie *et al.* (1990). La imagen de satélite utilizada en este trabajo fue descargada de la página GLOVIS gestionada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y consiste en una imagen ASTER, nivel L1B, con fecha del 24/10/2004 y registro: AST_07.XT_00310242004172742_20160603143241_4421. La imagen se procesó con el programa ENVI v. 4.7.

Resultado

Petrografía

La riolita, presenta textura mesocristalina a holocristalina, porfirítica, con una variación de fenocristales del 5 al 40 % de sanidino, cuarzo,

oligoclasa y biotita y, como mineral accesorio se observa magnetita alterada a hematita. La matriz de esta muestra se encuentra parcialmente desvitrificada (figura 4a). En las lavas riolíticas y riodacíticas, la alteración por oxidación en la matriz reemplaza completamente al vidrio, formando una mesostasis hematizada (figura 4b) o argilizada (figura 4c). En la latita, se presenta una textura holocristalina, inequigranular, porfirítica, con una proporción de 10-15 % de fenocristales euhedrales-subhedrales cuyos tamaños varían de 2 a 6 mm y la composición consiste en sanidino, plagioclasa y cuarzo en menor cantidad. La matriz de la muestra es afanítica, con microlitos de plagioclasa; tiene abundante magnetita y como accesorios zircón y apatito.

En la traquita, se observa una textura microcristalina, inequigranular, porfirítica; con 5-10 % de fenocristales euhedrales a subhedrales de 1 a 5 mm de plagioclasa, en una matriz mesocristalina con microlitos de plagioclasa y abundante magnetita oxidada. La riodacita es de textura porfirítica, con una proporción de 10 a 15 % de fenocristales de 2 a 6 mm de plagioclasa, sanidino y cuarzo, en una matriz desvitrificada. El basalto, presenta una textura inequigranular microporfídica, con matriz afanítica, con pequeños cristales de andesina, y de olivino alterado a iddingsita (figura 5).

Firmas espectrales de campo

Los resultados muestran que las firmas espectrales de las riolitas y riodacitas sin alteración son muy similares en su comportamiento



Figura 5. A) Muestra de mano de basalto en donde se puede apreciar tanto la parte fresca como la zona alterada, principalmente por oxidación. **B)** Fotografía de microscopio con luz natural y aumento de 5x en donde se observan los cristales de olivino con el borde de iddingsita. / **Figure 5. A)** Hand sample of basalt where it is possible to appreciate the fresh and the altered rock by oxidation. **B)** Microscope photograph with natural light and 5x of zoom where olivine crystals have an iddingsite edge.

espectral (figura 6). La firma espectral de la riolita (SSM-02) en el registro de campo muestra un ascenso constante de reflectividad, sin sobrepasar el 40 % de reflectancia, con dos ligeros picos de reflectividad, uno hacia los 600 nm y otro a los 700 nm (figura 6a). En esta firma se detecta la presencia de ruido a partir de los 950 nm (infrarrojo cercano). En otro punto de verificación (SSM-14), la riolita presenta un comportamiento similar, sin embargo, el comportamiento ascendente no es tan evidente (figura 6b), pero se conserva la anomalía positiva a los 600 nm, y el ruido en el segmento final de la firma espectral. En la riodacita (SSM-16), la firma espectral de campo muestra un aumento en la reflectividad, que comienza en un 30% de reflectividad y continua hasta los 600 nm, donde hay una inflexión y a partir de esta longitud de onda, tiene un comportamiento casi constante, para finalizar con ruido a partir de los 900 nm (figura 6c). En el caso de las traquitas (SSM-13), hay un marcado contraste con respecto a

las riolitas y riodacitas (figuras 4a, b, c), porque el comportamiento general de la firma espectral registrada es descendente (figura 6d). Las firmas espectrales de la unidad litológica de basaltos, presentan los valores más bajos para las firmas registradas para campo y laboratorio en toda la secuencia de rocas del CVSSM. Las firmas espectrales mantienen un comportamiento casi constante con valores bajos de hasta 10 % reflectividad en campo, y 5 % de reflectividad en laboratorio (figura 7). Esto significa que la firma de campo tiene una mayor reflectividad que en el laboratorio (figuras 6a y 6b). La firma espectral se ve afectada por ruido, a partir de los 900 nm., mientras que en las firmas de laboratorio, las muestras tanto de roca fresca, como de roca intemperizada, registran el ruido en los valores entre 400 - 500 nm (rango del ultravioleta). En la firma obtenida en campo también es notoria la inversión de valores de reflectividad entre la roca fresca y la roca alterada. La roca fresca tiene valores más altos de reflectividad en la región

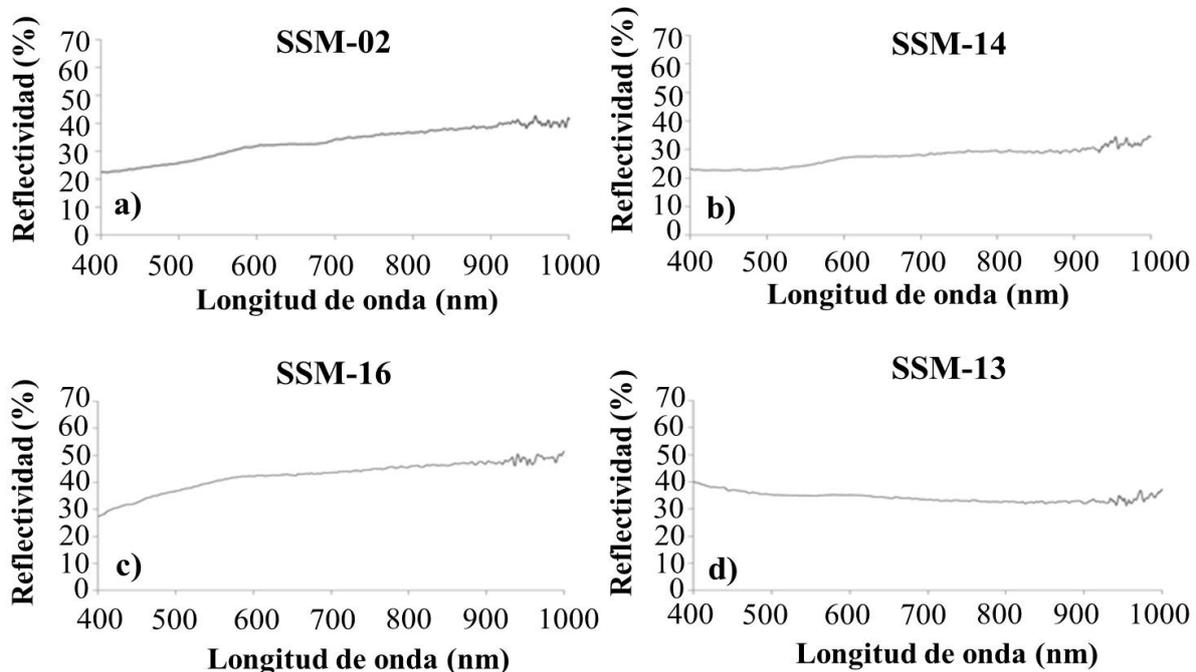


Figura 6. A) Firma espectral de la unidad de riolita (SSM-02), en donde se observa ruido ligero alrededor de los 950 nm. **B)** Firma espectral de riolita (SSM-14) que presenta una curva similar a la muestra SSM-02. **C)** Firma espectral de la riodacita (SSM-16), en la cual se distingue una inflexión hacia los 600 nm, y después se observa un comportamiento de meseta. **D)** Firma espectral de la traquita (SSM-13), mostrando los valores más altos de reflectividad en 400 nm y después disminuyen, sin embargo, conserva el rasgo de ruido a partir de los 950 nm. / **Figure 6. A)** The spectral signature of the rhyolite unit (SSM-02), where there is a feature of light noise around the 950 nm. **B)** The spectral signature of rhyolite (SSM-14) whose curve is similar to the sample SSM-02. **C)** The spectral signature of the riodacite (SSM-16), in which an inflection occurs at 600 nm, and then a plateau behavior is observed. **D)** The spectral signature of the trachyte (SSM-13), showing the highest values of reflectivity at 400 nm and then decrease, however, retains the feature of noise from 950 nm.

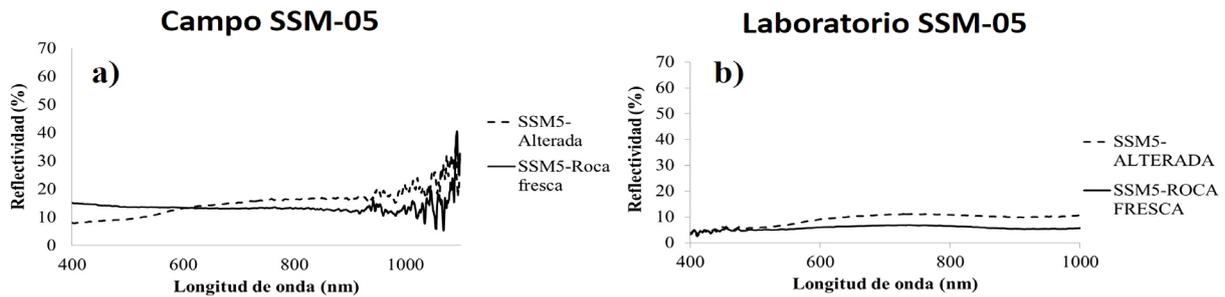


Figura 7. Firmas espectrales de la muestra SSM-05 en **A)** campo y **B)** laboratorio. La roca es un basalto que muestra valores bajos de reflectividad en roca fresca y el incremento de reflectividad en roca alterada. También se observa cambios con respecto a la región en donde se presenta ruido. En la firma espectral de campo (a), el ruido comienza alrededor de los 950 nm y en la firma espectral de laboratorio (b), el ruido se presenta entre los 400 y 500 nm. / **Figure 7.** The spectral signatures of SSM-05 registered in **A)** field and **B)** laboratory. The rock is a basalt, showing low reflectivity values if the rock is fresh and high reflectivity values if the rock is altered. Also observed changes on the region where noise arises. In the spectral signature of field (a), the noise starts around 950 nm and for the spectral signature of laboratory (b), the noise is between 400 and 500 nm.

del visible (400 a 600 nm) y baja su reflectividad en el infrarrojo. En cambio, el basalto alterado presenta un comportamiento opuesto, presentando los valores más altos de reflectividad en el infrarrojo y los valores más bajos en la región del visible (figura 7a).

Firmas espectrales de laboratorio

Se realizaron mediciones de firmas espectrales en laboratorio, bajo condiciones controladas de iluminación, ángulo de energía incidente y sin perturbaciones atmosféricas. El principal objetivo de las mediciones de laboratorio fue

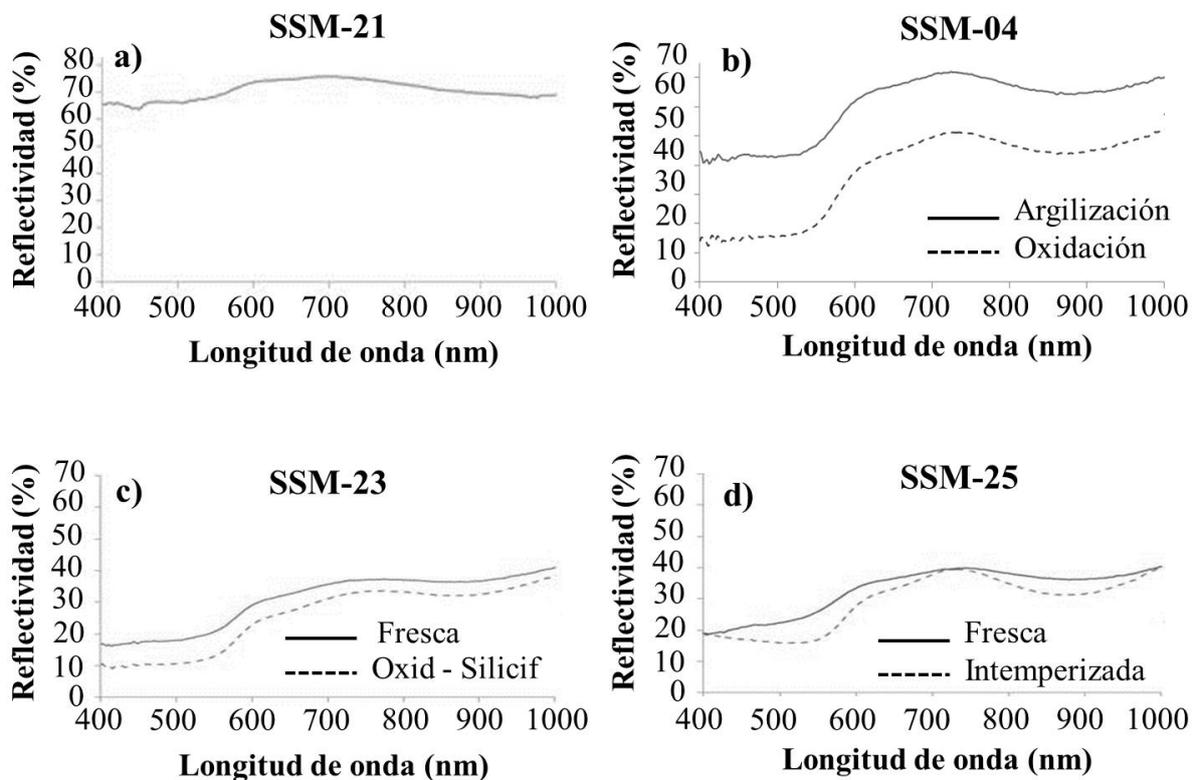


Figura 8. **A)** Firma espectral de la riolita con argilización (SSM-21). **B)** Firma espectral de riolita con oxidación y con argilización (SSM-04). **C)** Firma espectral de la riolita con oxidación y silicificación (SSM-23). **D)** Firma espectral de roca fresca vs roca intemperizada (SSM-25). Nótese la mejor definición en el rasgo de la curva de la roca fresca entre 600 y 800 nm. / **Figure 8.** **A)** The spectral signature of rhyolite with argilization (SSM-21). **B)** The spectral signature of rhyolite with oxidation and argilization (SSM-04). **C)** The spectral signature of rhyolite with oxidation and silicification (SSM-23). **D)** Spectral signatures of fresh and altered rock (SSM-25). Note the best definition in the feature of the curve of the unaltered rock between 600 and 800 nm.

comparar la firma espectral de las rocas en superficie fresca y sin alteración, con respecto a la misma roca, pero con alteración hidrotermal y/o intemperismo (figura 8). Las principales alteraciones hidrotermales encontradas en el CVSSM son la oxidación, argilización y en menor extensión, la silicificación. Cuando la roca ha sido expuesta únicamente al intemperismo, entonces presenta oxidación, argilización, decoloración y cobertura de vegetación (principalmente musgo). En el registro de la firma espectral de la riolita argilizada, se observan valores de reflectividad cuyo rango oscila entre el 60% y 70% y la curva presenta pocas variaciones (figura 8a) en forma de una línea monótona a partir de los 600 nm. La oxidación muestra una pequeña zona de valores más altos de reflectividad entre los 600 nm y 800 nm, generando un patrón distintivo entre la roca sana y la alteración (figura 8b). Al comparar la firma de oxidación con la de argilización, se observa una similitud en la forma de la curva de ambas alteraciones, la diferencia radica en que los valores de reflectividad de la oxidación son menores a los registrados para la argilización. Ambas firmas espectrales presentan un pico de reflectividad en los 600 nm y otro pico en los 750 nm con un ligero pico de absorción a los 850 nm (figura 8b). En el caso de las firmas espectrales de roca sana y roca alterada, el efecto que se identifica, es que la roca fresca tiene una curva con más inflexiones y la roca intemperizada tiene un patrón más suavizado (figuras 7c y 7d). La silicificación comúnmente viene asociada a la oxidación, por esa razón no se logró separar claramente las respuestas espectrales de ambas alteraciones.

Firmas espectrales de campo, laboratorio e imagen ASTER

Con fines comparativos, se analizaron las respuestas espectrales de la riolita y del basalto, porque ambos tipos de rocas tienen registro de firma espectral en las colecciones del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) y en la biblioteca espectral del Jet Propulsion Laboratory (JPL) (Clark *et al.*, 1993). Las de riolitas, latitas y traquitas no se compararon, dado que no se cuenta con una curva de referencia para compararlas. También, se extrajeron la firma espectral del basalto y la riolita a partir de una imagen ASTER. La respuesta espectral de la imagen ASTER y de las bibliotecas espectrales del JPL presentan una curva más suavizada que la firma de laboratorio y campo (figuras 9a y 9b). En la a se observa que la curva de laboratorio de la riolita muestra valores de reflectividad más altos con respecto a las otras tres firmas espectrales (campo, JPL y ASTER). Además, la firma de laboratorio presenta mayores detalles con respecto a los picos de reflectividad y las zonas de absorción. La respuesta espectral de la imagen ASTER es una curva suavizada y la firma espectral de campo, es la de más baja reflectividad. Se observa que el pico de reflectividad se ubica entre los 600 nm y 800 nm. La firma de campo presenta ruido, este fenómeno es común en muestras registradas en campo, debido a la interacción de la energía con los efectos propios de la atmósfera (Jensen, 2007). En la figura 9b, la respuesta de campo es la más alta, y las curvas de laboratorio y la extraída de la imagen ASTER son muy similares en sus valores y en

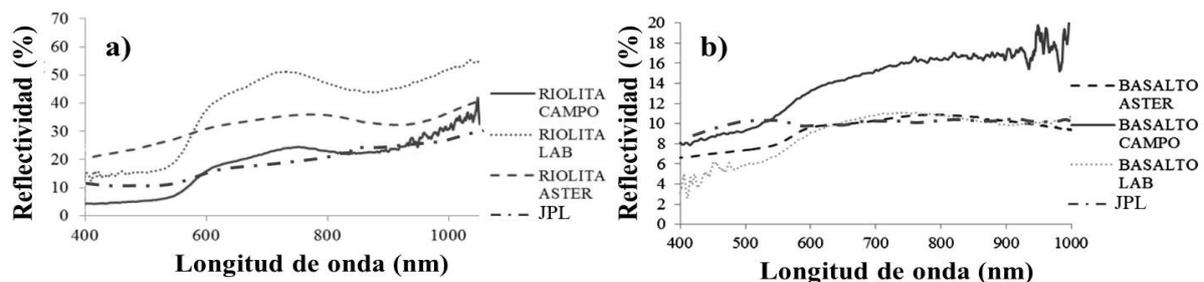


Figura 9. A) Firmas espectrales de la unidad de riolita. **B)** Firmas espectrales del basalto. / **Figure 9. A)** Spectral signatures of the rhyolite unit. **B)** Spectral signatures of the basalt rock.

su patrón. La firma del JPL muestra valores de reflectividad más altos en la región del visible en comparación con lo observado en laboratorio y en ASTER, pero en la región del infrarrojo, el comportamiento es muy similar a lo observado en laboratorio y en la imagen ASTER. Además, tanto para la muestra de riolita como en la del basalto, en la curva espectral obtenida en laboratorio se aprecia ruido en la región visible entre el azul y verde (400-500 nm), indicando que estas zonas son especialmente susceptibles a los espacios con poca iluminación.

Conclusiones

El registro y análisis de firmas espectrales es una técnica muy útil para extraer información litológica de forma rápida, en tiempo real y de fácil almacenamiento y manipulación. Tradicionalmente, para la litología se trabaja con la zona del infrarrojo medio y térmico porque es donde se presentan las mayores diferencias espectrales para minerales y roca. Sin embargo, a pesar de que el espectrorradiómetro utilizado en este trabajo está limitado en el rango espectral visible – infrarrojo cercano (400 a 1000 nm), fue posible obtener información que permitió caracterizar y separar la roca sana de la roca alterada que constituye al CVSSM. Para lograr comprender mejor la respuesta espectral de la roca, este trabajo se apoyó en información cartográfica existente para validar los resultados de las firmas espectrales; pero también se validaron los resultados con los puntos de verificación y las muestras de mano a las cuales se les realizó un análisis petrográfico. Algunas diferencias entre las rocas sanas y las rocas alteradas, son observadas mediante la petrografía que indica que toda la roca alterada tiene distribuidos los óxidos de hierro de forma uniforme en la matriz y, lo mismo pasa con la agilización que se distribuye de forma generalizada en la matriz y en los fenocristales de plagioclasa y sanidino. Por esta razón, de manera general, los valores de reflectividad aumentan en la roca alterada, porque que los fenocristales y la matriz de las rocas se comportan en su totalidad como arcillas. Debi-

do a que la silicificación viene estrechamente relacionada con la oxidación, no se logró separar la respuesta espectral porque ambas curvas son muy similares y las diferencias en reflectividad son menores del 5%. En todos los casos se observaron diferencias entre las firmas espectrales registradas en campo con respecto a aquellas registradas en laboratorio, extraídas de ASTER y las pertenecientes a las bibliotecas espectrales del JPL. De todas las firmas observadas, las que fueron registradas en laboratorio separan mejor las anomalías en reflectividad o absorción asociadas a las rocas alteradas. En las firmas espectrales extraídas en campo se presenta ruido en la parte del infrarrojo cercano, mientras que en las firmas de laboratorio, la presencia de ruido es registrada en el rango del visible.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte de la tesis de licenciatura de Rafael Gaytán Martínez que fue apoyado parcialmente por el proyecto PROMEP/103.5/13/6575 de la Dra. Cristina Noyola Medrano, por medio del cual se adquirió el espectrorradiómetro Apogee UV-NIR PS 300. Los materiales para la elaboración de las láminas delgadas, fueron patrocinados por el proyecto interno No. 2015-01-II de Marco A. Rojas Beltrán, en el laboratorio de petrografía del Área Ciencias de la Tierra, de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. Los autores agradecen a los revisores por los comentarios que ayudaron a mejorar el manuscrito.

Referencias

- Abrahms, M.J., Rothery, D.A., and Pontual, A. 1988. Mapping in the Oman ophiolite using enhanced Landsat Thematic Mapper images. *Tectonophysics*, 151 227 (1-4): 387-401.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., López-Doncel, R.A., García-Arreola, M.E., Almaguer-Rodríguez, J.L. y Maury, R.C. 2012. Trace elements geochemistry and origin of volcanic units from the San Luis Potosí and Río Santa María volcanic fields, México: the bearing of ICP-QMS data. *Geofísica Internacional*, 51 (3): 293-232 308.
- Aguillón-Robles, A., Tristán-González, M., Aguirre-Díaz, G., López-Doncel, R.A., Bellon, H., y Martí-

- nez-Esparza, G. 2014. Eocene to Quaternary mafic-intermediate volcanism in San Luis Potosí, central México. The transition from Farallon plate subduction to intra-plate continental magmatism. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 256: 152-172.
- Baldrige, A.M., Hook, S.J., Grove, C.I. and Rivera, G. 2009. The ASTER spectral library version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113 (4): 711-715.
- Brandmeier, M., Erasmí, S., Hansen, C., Höweling, A., Nitzsche, K., Ohlendorf, T., Mamani, M. and Wörner, G. 2013. Mapping patterns of mineral alteration in volcanic terrains using ASTER data and field spectrometry in Southern Peru. *Journal of South American Earth Sciences*, 48: 296-314.
- Cano-Martín, J. 2009. Radiometría de campo para la identificación de variaciones edafológicas en zonas afectadas por incendios. Universidad de Zaragoza, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio. *Tesis de maestría*. 125 pp. 247 inédita.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A.J., King, T.V.V., and Calvin, W.M. 1993. The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 um). Open File Record 93-592. 1326 pp.
- Di Tomasso, I. and Rubinstein, N. 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*, 253 32 (1-2): 275-290.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., y Bryan, S. 2005. Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3): 343-378.
- Jensen, J. R. 2007. Remote sensing of the environment: An earth resource perspective 2/e. *Pearson Prentice Hall*. 592 pp.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., y Aranda-Gómez, J.J. 1982. Revisión Estratigráfica del Cenozoico de la parte central del Estado de S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. *Instituto de Geología y Metalurgia*. Folleto Técnico No. 85, 208 pp.
- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S. 1992. Características Físicas y Estructura de Lavas e Ignimbritas Riolíticas en la Sierra de San Miguelito, S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. *Instituto de Geología*. Folleto Técnico No. 114, 31 pp.
- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S. 1993. Geología del Domo Cerro Grande, Sierra de San Miguelito, S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. *Instituto de Geología*. Folleto Técnico No. 117, 22 pp.
- Labarthe-Hernández, G. y Jiménez-López, L.S. 1994. Geología de la Porción Sureste de la Sierra de San Miguelito, S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. *Instituto de Geología*. Folleto Técnico No. 120, 34 pp.
- López-Loera, H. y Tristán-González, M. 2013. Geología y magnetometría aérea del Graben de Villa de Reyes, San Luis Potosí, Mesa Central de México: implicaciones tectónicas y geohidrológicas. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1): 137-156.
- MacKenzie, W.S., Donaldson, C.H., & Guilford, C. 1990. Atlas of igneous rocks and their textures. John Wiley & Sons, 148 pp.
- McCoy, R.M. 2005. Field Methods in Remote Sensing. The Guilford Press. ISBN 1-59385-079-4, 158 pp.
- Mars, J.C., and Rowan, L.C. 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment*, 114 (9): 2011-2025.
- Milton, E.J., Schaepman, M.E., Anderson, K., Kneubühler, M. and Fox, N. 2009. Progress in field spectroscopy. *Remote Sensing of Environment, Imaging Spectroscopy Special Issue*, 113 (1): 92-109.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A., y Camprubí y Cano, A. 2005. La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57 (3): 285-318.
- Ninomiya, Y., Fu, B. and Cudahy, J.T. 2005. Detecting lithology with Advanced Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor" data. *Remote Sensing of Environment*, 99 (1-2): 127-287 139.
- Noyola-Medrano, M.C., Hinojosa-Corona, A. y Martín-Barajas, A. 2005. Caracterización litológica de regiones desérticas mediante técnicas de percepción remota: Un ejemplo en la franja costera central de Baja California, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22, (2): 229-245.
- Rodríguez-Ríos, R. y Torres-Aguilera, J.M. 2009. Evolución petrológica y geoquímica del vulcanismo bimodal oligocénico en el campo volcánico de San Luis Potosí (México). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (3): 658-673.
- Rowan, L.C., Goetz, A.F.H. and Ashley, R.P. 1977. Discrimination of hydrothermal altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images. *Geophysics*, 42 (3): 522-235.
- Rowan, L.C. and Mars, J.C. 2003. Lithological mapping in the Mountain Pass area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, 84 (3): 350-366.
- Ruiz-Armenta, J.R. and Prol-Ledesma, R.M. 1998. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteration minerals in Thematic Mapper images of Central Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 1981-2000.
- Srinivasan, V., Sevugan-Chetty, A., Swaminathan, V.L. and

- Tamilarasan, V. 1980. Use of Landsat Data products for geological mapping- a case history in Tamilnadu, India. *Remote Sensing and Mineral Exploration*, 131-137.
- Torres-Hernández, J.R., Labarthe-Hernández, G., Aguilón-Robles, A., Gómez-Anguiano, M. y Mata-Segura, J.L. 2006. The pyroclastic dykes of the Tertiary San Luis Potosí Volcanic Field: implications on the emplacement of Panalillo ignimbrite. *Geofísica Internacional*, 243: 243-253.
- Tristán-González, M., Aguilón-Robles, A., Barboza-Gudiño, J.R., Torres-Hernández, J.R., Bellon, H., López-Doncel, R., Rodríguez-Ríos, R. y Labarthe-Hernández, G. 2009. Geocronología y distribución espacial del vulcanismo en el Campo Volcánico de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61 (3): 287-303
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H.M.A., Van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C.A., Bakker, W.H., Noomen, M.F., Van der Meijde, M., Carranza, E.J.M., Bou-dewijn de Smeth, J. and Woldai T. 2012. Multi- and hyperspectral geological remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14 (1): 112-128.
- Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A.F. and Alaniz-Alvarez, S.A. 2004. Vertical shear mechanism of faulting and estimation of strain in the Sierra de San Miguelito, Mesa Central, México. *Geological Acta*, 2: 189-201.
- Xu, S.S., Nieto-Samaniego, A.F., y Alaniz-Alvarez, S.A. 2012. Emplacement of pyroclastic dykes in Riedel shear fractures: An example from the Sierra de San Miguelito, Central México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 250: 327 1-8.
- Yuan, D., Lucas, J.R. and Holland, D.E. 1998. A Landsat MSS time series model and its applications in geological mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (1): 39-53.