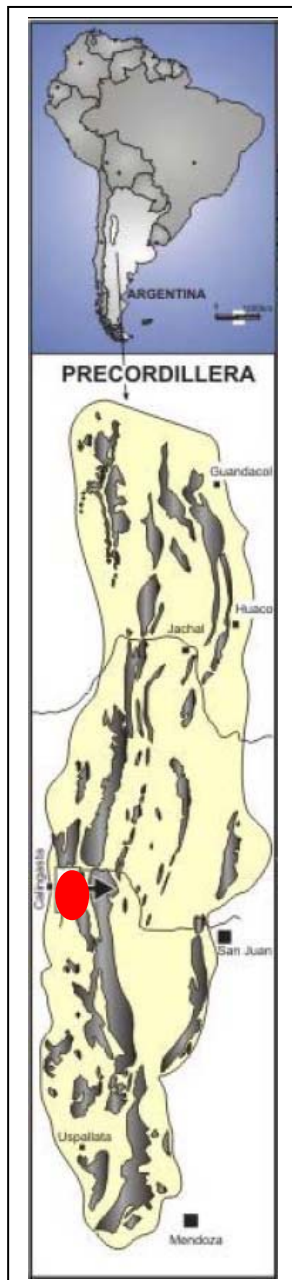


DATOS ASTER EN LA QUEBRADA DE ALCAPARROSA , CALINGASTA, PROVINCIA DE SAN JUAN, ARGENTINA.

Marquetti, Cintia
Di Tommaso, Ines
Herrmann, Carlos
Nakashima, Kiyoharu

SEGEMAR, Julio A. Roca 651, piso 8, sector 1. (1322) Ciudad de Buenos Aires.
cmarqu@geosatar.gov.ar

Introducción



El presente trabajo se ha llevado a cabo en el marco del proyecto GEOSAT-AR, convenio binacional entre el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR) y la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA). El área de estudio está ubicada en el sector occidental de la Precordillera sanjuanina y limitada al oeste por el valle de Calingasta, al norte por el río San Juan y al este por la Sierra de Tontal (figura 1).

En ella se destaca la presencia de una mineralización polimetálica alojada en basaltos (yacimiento Santa Elena) y de Cu, Mo en un intrusivo ácido. Una extensa zona de alteración de 6 km x 1,5 km de longitud compuesta por sulfatos de Fe (Mg y Al subordinados) es la característica visual distintiva del área (“faja amarilla”).

La importancia de su estudio radica en la determinación de la participación de los eventos intrusivos en la mineralización y alteración del sector. La génesis de la mineralización es considerada volcanogénica por Zappettini et al. (1999) o relacionada con los intrusivos subvolcánicos ácidos a mesosilícicos para Meissl y Maidana (1983), entre otros autores.

Se han utilizado datos ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), sensor de última generación que se encuentra a bordo del satélite TERRA, en órbita desde fines de 1999. Este sensor tiene un ancho de barrido de 60 km. y cubre una amplia región espectral con 14 bandas, desde el visible al infrarrojo térmico, con una alta resolución espacial.

ASTER posee tres subsistemas de sensores: VNIR, SWIR y TIR. El subsistema VNIR cuenta con dos telescopios, uno con visión nadir y el otro con visión hacia atrás, mientras que los sensores SWIR y TIR tienen un solo telescopio cada uno.

El subsistema VNIR obtiene imágenes del visible e infrarrojo cercano (0.52-0.86 μm) en tres bandas con una resolución espacial de 15 metros, además tiene una banda adicional que permite visión estereoscópica y la generación del Modelo Digital de Terreno de cada escena.

El subsistema SWIR registra la información en 6 bandas del infrarrojo de onda corta (1.600-2.430 μm) con una resolución espacial de 30 metros. El subsistema TIR obtiene datos en 5 bandas en la región del

infrarrojo térmico (8.125-11.65 μm) con una resolución espacial de 90 metros.

Figura 1: Mapa de ubicación

El logro de ASTER es la adquisición de datos espectrales cuantitativos de radiación reflejada y emitida desde la superficie terrestre con una resolución espacial y espectral apropiada para varios objetivos científicos (Fujisada, 1998). Las bandas del VNIR pueden ser utilizadas para la detección de vegetación y de óxidos de hierro presentes en rocas y en suelos. El rango espectral que presentan las bandas del SWIR abarca la zona de absorción característica de filosilicatos, carbonatos y minerales de alteración lo que permite una discriminación más detallada de éstos (Yamaguchi, 1998). Los patrones de emisividad de las 5 bandas del TIR son utilizados para estimar el contenido de sílice presente en las rocas.

En particular, el aporte de datos ASTER permitió ampliar el conocimiento de la distribución de los cuerpos intrusivos en el área y su alteración, como así también la discriminación litológica de las distintas formaciones geológicas.

Geología del área de estudio

En el área afloran (Furque y Caballé, 1986) mayoritariamente mantos de basaltos y rocas sedimentarias turbidíticas y pelágicas de las Formaciones Alcaparrosa y Don Polo, de edad ordovícica. Lutitas de la Formación Calingasta (Silúrico) y sedimentitas continentales de la Formación El Planchón (Devónico) completan la secuencia sedimentaria junto con areniscas y conglomerados de las formaciones El Ratón (Carbónico) y El Salto (Pérmico inferior). Cuerpos intrusivos de presunta edad pérmica superior se alojan en la secuencia sedimentaria descripta.

El sector estudiado –quebrada de Alcaparrosa y otras al sur de ella– expone principalmente la alternancia volcánico-sedimentaria de la Formación Alcaparrosa y la presencia de cuerpos intrusivos hipabisales.

Formación Alcaparrosa:

Se compone de una alternancia de areniscas y lutitas con mantos de lavas almohadilladas (Quartino et al., 1971). Los bancos de areniscas son de coloración grisácea con espesores inferiores a 20 cm y presentan laminación entrecruzada e intercalaciones de conglomerados. En ocasiones se hallaron también bancos de calizas de grano fino. El contenido fosilífero de esta formación, determinado por la presencia de braquiópodos y graptolites (Turner, 1960) le adjudican edad ordovícica (Caradociano).

Los mantos de lavas almohadilladas son de composición basáltica y se hallan intercalados en la columna sedimentaria con espesores de entre 30 y 50 metros. La edad de 416 ± 19 Ma (K/Ar sobre roca total) de estas volcanitas (Vilas y Valencio, 1978) coincide con la del contenido paleontológico de los exponentes sedimentarios. Kay et al. (1984) determinaron su afinidad con un ambiente de cuenca de tras-arco que representaría el cierre de un antiguo océano ubicado entre Precordillera y Cordillera Frontal (Haller y Ramos, 1984).

En la quebrada de la Alcaparrosa estas lavas muestran alteración hidrotermal y alojan mineralización de sulfuros primarios y sulfatos secundarios. La Sierra Bandeada, en el límite SO de la quebrada Alcaparrosa, expone una unidad lávica mantiforme que corresponde a filones capa de 10 a 30 metros de espesor con intercalaciones de orden métrico de areniscas y lutitas.

Intrusivos subvolcánicos:

Sobre la margen oriental del Valle Calingasta-Uspallata afloran pequeños cuerpos intrusivos hipabisales de composición riodacítica o monzonítica, cuyo emplazamiento originó hornfels en pelitas y areniscas encajonantes.

En la quebrada de Alcaparrosa el intrusivo más reconocido (Pórfiro Alcaparrosa) posee textura porfírica con fenocristales de plagioclasa (40% del total de la roca), cuarzo, biotita y hornblenda. La pasta es microgranosa y está compuesta por cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico con cantidades subordinadas de biotita, magnetita, hornblenda y apatita (Quartino et al., 1971). Porta mineralización de sulfuros en venillas de cuarzo y feldespato potásico y también diseminada. Las alteraciones asociadas son biotitización, silicificación, feldespatización y sericitización.

Estas intrusiones cuentan con una determinación de edad (Sillitoe, 1977) que arrojó 267 ± 4 Ma (Pérmico superior), realizada en el pórfiro de la quebrada de Alcaparrosa.

Sedimentos cuaternarios:

En la zona de estudio los sedimentos cuaternarios conforman conos aluviales, deslizamientos, depósitos de pedimentos, terrazas fluviales y aluviones.

Mineralizaciones en el área de estudio

Los intrusivos subvolcánicos (Pórfiro Alcaparrosa y otros):

En la quebrada de Alcaparrosa y alrededores las intrusiones mesosilícicas se encuentran asociadas con mineralización de sulfuros. El denominado Pórfiro Alcaparrosa aflora en la quebrada homónima; también se reconocen escasas manifestaciones de intrusiones menores que se disponen definiendo una zona elongada en dirección noroeste-sudeste. Esta disposición se correlaciona espacialmente con el gran halo de alteración a sulfatos de la denominada Faja Amarilla que abarca una extensión aproximada de 9 km^2 .

Circundando principalmente al Pórfiro Alcaparrosa, se halla mineralización primaria de sulfuros de Cu (Mo, Zn) que se aloja tanto en los intrusivos como en las sedimentitas de la Formación Alcaparrosa.

El mismo evento generó silicificación, sericitización y biotitización. Los sulfuros primarios se encuentran diseminados o en venillas de cuarzo y feldespato potásico con piritita y pirrotina, junto a calcopiritita, molibdenita y blenda en menor proporción (Quartino et al., 1971). Covelina y calcosina se presentan como minerales de alteración de calcopiritita. Como minerales accesorios se reconocen marcasita, arsenopiritita y mackinawita (Belvideri y Rossa, 1994).

Los sulfatos (la Faja Amarilla y otros):

La Faja Amarilla es un área de oxidación que se extiende a lo largo de 6 km con un ancho máximo de 1500 metros, con orientación noroeste-sudeste, delimitada por las quebradas de la Alcaparrosa y la Sierra Bandeada. Dichos filos son divisorias de agua que concentran los productos de alteración hacia el valle. La Faja Amarilla está compuesta mayoritariamente por limonitas y sulfatos de hierro. Quartino et al. (1971) observaron texturas en corona donde los sulfatos siguen a núcleos de sulfuros de hierro.

La forma de la capa de oxidación es coincidente con la forma del relieve, hecho que según Quartino et al. (1971) prueba la juventud del proceso.

En los niveles superiores de las estructuras del yacimiento Santa Elena también se presenta mineralización de sulfatos, producto de la alteración de la mineralización primaria de sulfuros alojados en lavas basálticas. Angelelli y Trelles (1938) determinaron allí la presencia de ferropalidita, calingastita, copiapita, coquimbita, holmannita, fibroferrita, botryógeno, goslarita, yeso, epsomita, pickeringita y azufre, sugiriendo que la génesis de los sulfatos de hierro responde a procesos de oxidación e hidratación de los sulfuros primarios debido a agentes atmosféricos.

El yacimiento de sulfuros Santa Elena:

El yacimiento Santa Elena, ubicado al NO de la quebrada de Alcaparrosa, es un depósito explotado por sulfatos desde mitad del siglo pasado, y posteriormente explorado en profundidad por su mineralización primaria, que se compone de pirita portadora de oro, marcasita, pirrotina, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, galena con inclusiones de sulfosales (?) y probable bismuto nativo, diseminados en las rocas que los albergan o relleno de finas venillas (Meissl y Maidana, 1983; Angelelli y Trelles, 1938; Quartino et al., 1971 y Zappettini y Brodtkorb, 2000).

La estructura de estas concentraciones de sulfuros primarios es de cuerpos vetiformes con geometría tabular, alojados en lavas basálticas que se encuentran fuertemente alteradas en las proximidades de las estructuras; Meissl y Maidana (1983) indican alteración propilítica, limonitización, carbonatización, sericitización y argilitización.

Datos ASTER

Se utilizó una imagen nivel 1^a, se procesó con los programas ASTER *Dem Data Generation* y el ASTER *Geocoded Ortho Image Generation* desarrollados y cedidos por el Comité Científico de ASTER para plataforma UNIX, el primero utiliza la tecnología de *stereo matching* entre las bandas 3N y 3B, con esto se genera una matriz de elevación de 30m x 30m, lo que implica un dato de altura (z) cada 2 píxeles.

El programa ASTER *Geocoded Ortho Image Generation* ortorrectifica con la información del modelo digital de terreno y re proyecta la imagen y el modelo digital de terreno a un plano de referencia predeterminado. El dato resultante es la imagen ortorrectificada y el modelo digital de terreno ortorrectificado con 15m de resolución espacial.

Normalización de los Datos Digitales

Para la utilización de técnicas de análisis y mapeo a partir de similitud espectral, *spectral matching* los datos ASTER deben ser normalizados entre los valores máximos y mínimos de la escena, ya sea con datos espectrales de campo, o en su defecto con datos de la propia imagen.

Los productos ASTER estándar incluyen imágenes de reflectancia a superficie nivel 2B. Por otro lado al no contar con estos productos, se pueden obtener imágenes de reflectancia relativa teniendo en cuenta los siguientes conceptos:

El sistema ASTER ha sido calibrado de forma tal que los números digitales DN están en relación lineal con la reflectancia (Yamaguchi y Naito, 1999).

Para el diseño de los detectores de los subsistemas VNIR y SWIR y con el objeto de evitar la saturación de blancos brillantes, el máximo de radiancia corresponde al 70% del valor de reflectancia (Aster User's Guide, 2001). Otro elemento a tener en cuenta es el *offset*, valor aditivo variable en cada banda que debe ser removido para la normalización del dato radiométrico.

Sin datos de reflectancia de campo, como en este caso, la normalización del valor radiométrico se realizó teniendo en cuenta la siguiente relación:

Reflectancia Relativa = (Radiancia a sensor – offset / Máximo valor) * 0.7

Procesamiento digital

Se realizaron distintas combinaciones y cocientes de bandas con el fin de identificar los cuerpos intrusivos y las zonas de alteración argílica y de oxidación.

La combinación RGB : 3 2 1, con una resolución espacial de 15 m., resulta muy útil para la identificaciones de la Formación Alcaparrosa, diferenciando las secuencias lávicas y pelíticas (figura 2). A esta combinación se le aplico la técnica *saturation stretch* resultando una imagen con un mayor contraste, donde se realzan las diferencias entre las distintas composiciones litológicas (figura 3). Podemos observar en tonos azules los bancos donde predominan las rocas pelíticas, con las que se asocian sulfatos de aluminio y magnesio. En tonos de castaños oscuros se discriminan las rocas lávicas de composición basáltica. También podemos observar en esta combinación, la zona de oxidación en tonos de amarillos y castaños claros.

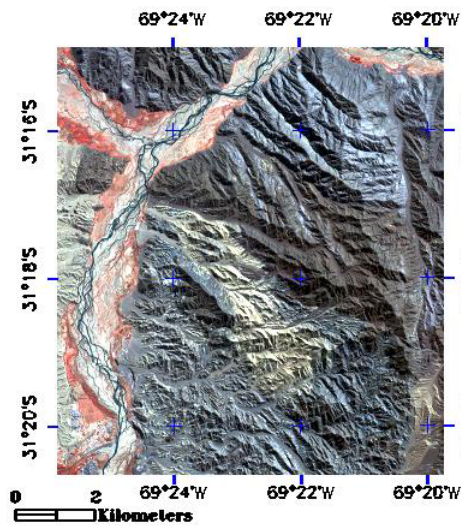


Figura 2: Subescena imagen ASTER RGB 321

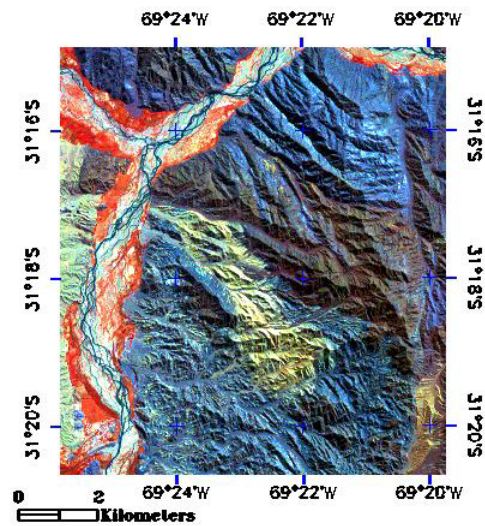


Figura 3: Subescena imagen ASTER RGB 321 Saturation Stretch

Se seleccionó la combinación RGB 4 6 1 incorporando bandas del SWIR para una mejor discriminación de la zona argílica y de oxidación. Observamos el área de alteración en color magenta y de forma elongada en dirección NNW-SSE, se corresponde con el rumbo general de estratificación de la Formación Alcaparrosa. En el extremo norte aflora un cuerpo intrusivo (Pórfiro Alcaparrosa) que presenta una zonación de colores, desde el contacto color amarillo y una transición de verde a azul hacia el núcleo del cuerpo (Figuras 4 a y 4 b)

Zona de Oxidación más arcillas

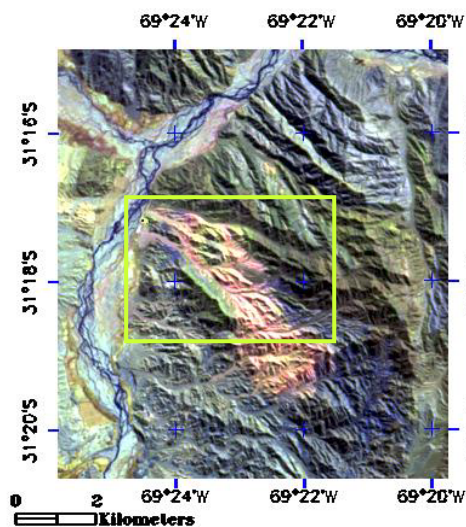


Figura 4a: Subescena imagen ASTER RGB 461

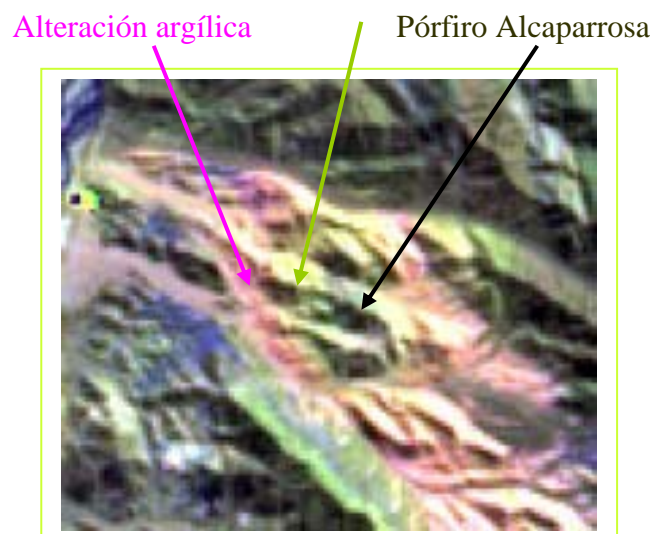


Figura 4b: Zoom imagen ASTER RGB 461

Se realizaron cocientes de bandas a partir del análisis de las características espectrales de los óxidos de Fe, las arcillas y los sulfatos de Al, Fe y Mg. Los óxidos de Fe pueden identificarse con el cociente 3/1 ya que la presencia del Fe produce una absorción muy fuerte entre los 0.5-0.7 μm (bandas 1 y 2).

El cociente 4/6 es útil para la identificación de las arcillas ya que se produce un pico de absorción en los 2.20 μm por la presencia del OH-Al. Para la identificación de jarosita se utilizó la banda 4/7, ya que tiene un pico de absorción en los 2.26 μm .

En la combinación RGB 3/1 4/6 4/7 se observa la zona de oxidación en color verde y en los extremos del área estudiada se destacan el pórfiro del norte ya mencionado y un nuevo cuerpo intrusivo en el sur; este presenta una respuesta diferente debido a la alteración más intensa (figura 5).

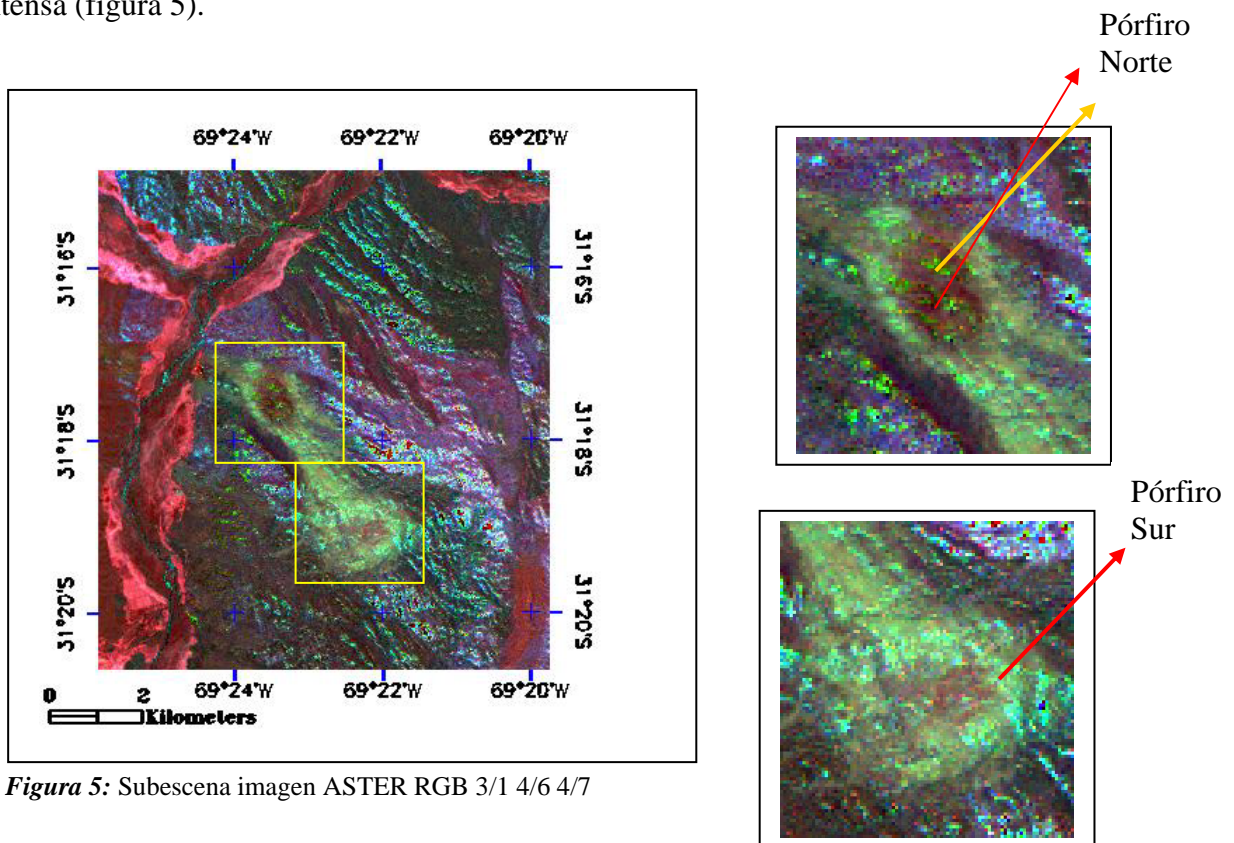


Figura 5: Subescena imagen ASTER RGB 3/1 4/6 4/7

Análisis Espectral

Las siguientes figuras muestran las respuestas espectrales de las rocas recolectadas en el terreno y medidas con el espectrorradiómetro GER 3700.

En abscisas se representan las longitudes de onda en el rango del infrarrojo de onda corta y en ordenadas los valores de reflectancia.

Se seleccionaron firmas representativas de las zonas de oxidación y alteración argílica.

La figura 6A muestra el espectro que se interpretó como jarosita, donde se observa el pico de absorción característico en los 2.26 μm (banda 7), mientras que en la figura 6b se observa además de la absorción en la banda 7, un quiebre en la banda 6 (2.208 μm) debido a la mezcla de arcillas y jarosita (figura 4B)

En la figura 6C se observa la firma espectral de algunas muestras tomadas de la zona de alteración argílica. Se detecta el pico de absorción característico de las arcillas en los 2.20 μm .

La figura 6D muestra la firma espectral tomada de pillow lavas con alteración propilítica. El pico de absorción está en los 2.33 μm (banda 8), característico de clorita y calcita.

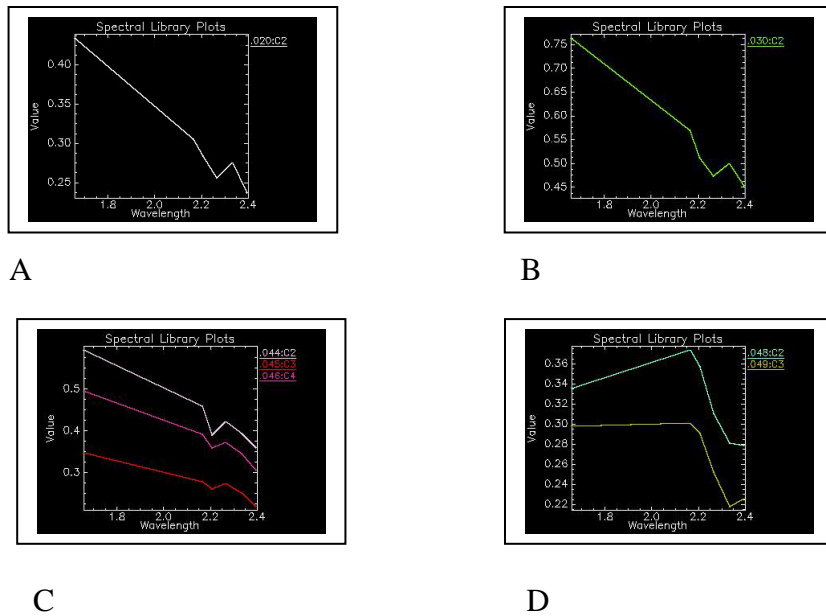


Figura 6: Firmas espectrales tomadas con GER y remuestreadas a los intervalos de ASTER

La figura 7 muestra tres curvas tomadas de la imagen de reflectancia relativa, en donde se seleccionaron los pixeles correspondientes a las zonas con presencia de jarosita, arcillas y la mezcla de ambos. Se puede observar que las firmas son muy similares a las tomadas con el espectrómetro. Las pequeñas diferencias se deben a que el pixel representa un promedio de reflectancia relativa del terreno en 30 metros de resolución espacial.

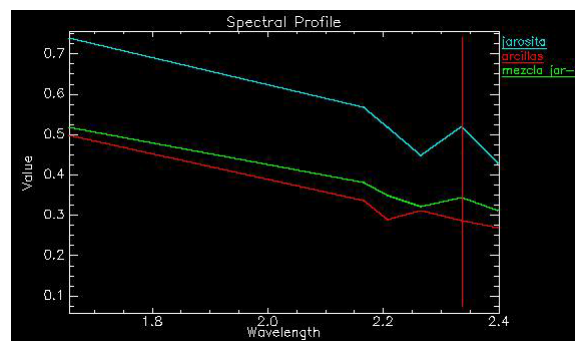


Figura 7: Firmas espectrales tomadas de la imagen ASTER normalizada

Resultados

Con la utilización de los cocientes de bandas 3/1, 4/6 y 4/7 se detectó la presencia de un cuerpo intrusivo con alto grado de alteración y meteorización que la combinación de bandas RGB 321 y RGB 461 no discriminó.

Estas combinaciones sí resultaron de utilidad para la identificación de un cuerpo intrusivo granodiorítico poco alterado. La técnica de *saturation stretch* aplicado a la combinación RGB 321 resaltó las diferencias litológicas entre los miembros pelíticos y lávicos de la Formación Alcaparrosa.

Existe una concordancia entre las firmas espectrales de la imagen de reflectancia relativa y las respuestas espectrales medidas en rocas pelíticas, pillow lavas y granodioritas así como en las asociaciones minerales de alteración argílica y de oxidación.

Bibliografía

ASTER User's Guide (version3.0), January 2001. ERSDAC Earth Remote Sensing Data. Japan.

Angelelli V. y Trelles, 1938. Las Alumbreras de Barreal y los sulfatos de hierro de la Alcaparrosa. Provincia de San Juan. Boletín Obras Sanitarias de la Nación, II N°7,8 y 9.

Belvideri I.L. y Rossa N.T., 1994. Mineralización asociada a los cuerpos subvulcánicos en la sierra del Tontal. San Juan. Argentina. VII Congreso Geológico Chileno. 2:746- 750.

Furque y Caballé, 1986. Descripción geológica de la Hoja 20 b Calingasta, provincia de San Juan. Biblioteca SEGEMAR, inédito. Buenos Aires.

Haller M. y Ramos V.A., 1984. Las ofiolitas famatinianas (eopaleozoico) de las provincias de San Juan y Mendoza. IX Congreso Geológico Argentino. 2:66-83.

Kay, S.M., Ramos V.A. y Kay R., 1984. Elementos mayoritarios y trazas de las volcanitas ordovícicas de la Precordillera occidental: basaltos de rift oceánico temprano? próximos al margen continental. IX Congreso Geológico Argentino. 2:48-65.

Meissl, E.F. y Maidana M.R., 1983. Mina Santa Elena, La Alcaparrosa. Provincia de San Juan, Argentina. II Congreso Nacional de Geología Económica. pp. 551-565.

Quartino, B.J., Zardini R.A. y Ramos V.A., 1971. Estudio y exploración geológica de la región Barreal-Calingasta. Asociación Geológica Argentina. Monografía N°1.

Sillitoe R.H. 1977. Permo-Carboniferous upper Cretaceous and Miocene Porphyry Copper type mineralization in the Argentina Andes. *Economic Geology*, 72(1): 99-109.

Turner J.C., 1960. Faunas graptolíticas de América de Sur. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*. 14(1-2):5.

Vilas J.F. and Valencio D.A., 1978. Paleomagnetism and K/Ar age of the Upper Ordovician Alcaparrosa Formation, Argentina. *Geophys. J. R.* 55:143-154.

Yamaguchi, Y. y Naito, Ch. 1999. Spectral Indices for Lithologic Discrimination Using the ASTER Swir bands. XIII International Conference on Applied Geologic Remote Sensing. Vancouver, British Columbia, Canada :I-151- I-158.

Zappettini, E., M.K. de Brodtkorb y N. Pezzutti, 1999. El yacimiento polimetálico Santa Elena, San Juan. En: Recursos Minerales de la República Argentina (Ed. O. Zappettini), Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Anales 35: 721-724. Buenos Aires.

Zappettini E. and Brodtkorb M.K., 2000. The VMS Santa Elena deposit, San Juan Province, Argentina. Geological Association of Canada. Mineral Deposit Division. Social Publication N2. Ed.: Ross Sherlock and M.A. Vilogan.