

Mapeo de Alteración Hidrotermal con datos ASTER, en la región de La Coipa, Cordillera Frontal (31°45' S), Provincia de San Juan, Argentina

Daniel José Pérez ¹,
Diego Azcurra ²,
Patricio D'Odorico ¹
Nicolas Sequeira ¹

¹Laboratorio de Tectónica Andina, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón II (1428), Buenos Aires, Argentina; daniel@gl.fcen.uba.ar

²SEGEMAR, Julio A. Roca 651 (1322) Buenos Aires, Argentina

Abstract. The study region is located at 31°55' LS and 70°00' WL, in the Frontal Cordillera of San Juan Province. The sequence is composed of a Permo-Triassic basement known as Choiyoi Group; it is composed of rhyolites and granites. Mesozoic deposits follow, they are represented by the volcanoclastic, pyroclastic and sedimentary rocks of the Rancho de Lata Formation (Triassic-Jurassic); Jurassic marine deposits of the Los Patillos and La Manga Formations (Lias-Dogger), and continental sequences of the Tordillo Formation (Malm). Finally and overlaying the latter sequence, continental sedimentary and volcanoclastic cretaceous sequences of the Diamante and Cristo Redentor Formations are developed. Digital image processing techniques were used with ASTER data to enhance lithologies and to detect alteration associated with possible mineral deposits. ASTER imagery was combined with field mapping and PIMA field data, into a geographic information system; and was integrated in order to establish the relationship with a structural model of the mineralized bodies.

Palabras-chave: Remote Sensing, Aster, Multispectral, Hydrothermal Alteration, Spectral Angle Mapper, San Juan, Frontal Cordillera, Miocene.

1. Introducción

El sensor ASTER a bordo del satélite TERRA presenta una órbita heliosincrónica a una distancia de 705 kilómetros, con un ciclo de repetición de 16 días, un ancho de barrido de 60 kilómetros y una distancia entre órbitas de 172 Km. ASTER está compuesto por 3 subsistemas, VNIR, SWIR y TIR; cada uno de cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del visible e infrarrojo cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del infrarrojo de onda corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 90 metros (ERSDAC, 2001). También presenta un telescopio con visual hacia atrás que escanea en la región espectral de la banda 3B, lo que nos permite realizar modelos digitales de terreno (MDT) por pares estereoscópicos.

El objetivo del presente trabajo, es presentar la clasificación e identificación de áreas de alteración hidrotermal en un sector de la Alta Cordillera sanjuanina, sobre la base del procesamiento de datos ASTER. Asimismo se intenta validar la presente metodología en la utilización y búsqueda de recursos minerales con interés económico.

El área de estudio se localiza en el sector occidental de la cordillera de Santa Cruz, en el curso medio del río homónimo (31°45' LS), provincia de San Juan, Argentina (ver figura 1).

Geológicamente el área forma parte de la Cordillera Principal y Cordillera Frontal y se ubica en el extremo sur del segmento de subducción subhorizontal "flat slab" (Cahill e Isacks, 1992). Esta región de San Juan está compuesta por un basamento prejurásico, las secuencias mesozoicas y depósitos volcánicos terciarios, de poco desarrollo y en las que destacan por las zonas de alteración hidrotermal de los yacimientos El Pachón y Pelambres (Fernández et al., 1974). Otras zonas de alteración han sido identificadas y localizadas en terreno, son La Coipa y Altares. La estructura de la región presenta un estilo de piel fina (*thin skinned*) en los sedimentos mesozoicos y de piel gruesa (*thick skinned*) con inversión tectónica que involucra el basamento permotriásico de la región (ver Figura 1).

2. Geología

La unidad más antigua en la región corresponde al Grupo Choyoi, constituido por riolíticas ignimbritas, las que están instruidas por granitoides de posible edad triásica (Ramos *et al.*, 1993). Estos presentan términos más tonalíticos con abundantes xenolitos máficos, gábricos a dioríticos, de grano fino a intermedio y con formas elipsoidales. Son rocas calcoalcalinas asociadas a un volcanismo de intraplaca extensional (Pérez y Ramos, 1996). Estas rocas forman la litología principal de la región y es precisamente donde se alojan las zonas identificadas con alteración hidrotermal (**Figuras 1 y 2**).

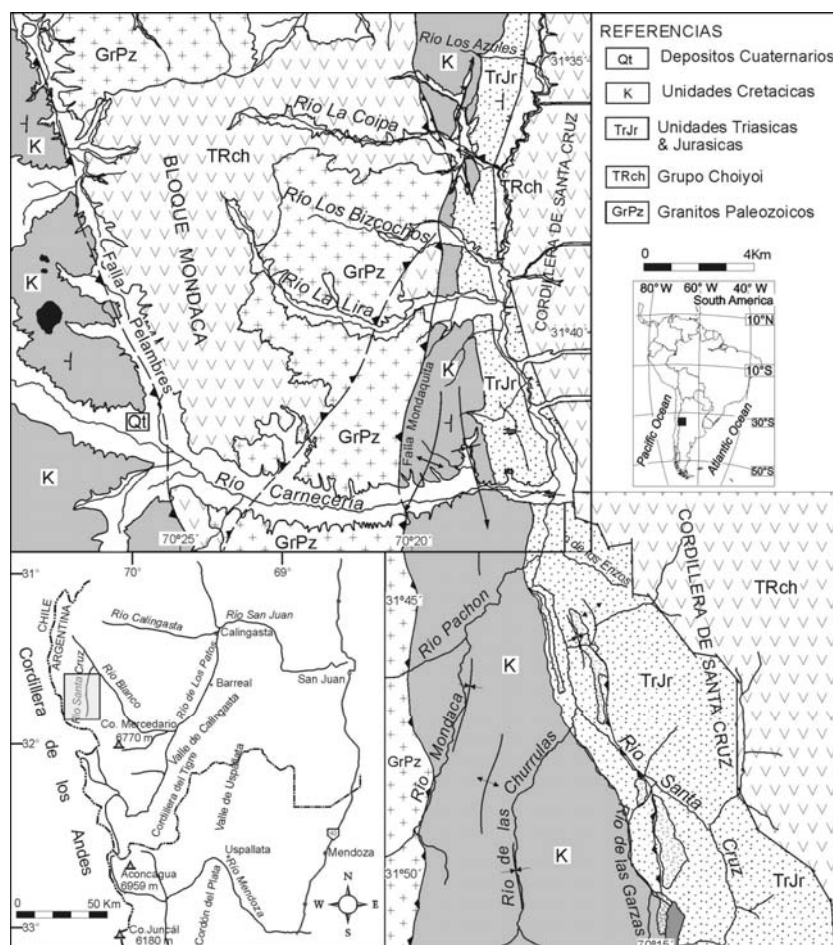


Figura 1. Mapa geológico y ubicación del área de estudio (D'Odorico *et al.*, 2006).

Continúa en discordancia angular las secuencias de rift de edad triásica superior a jurásica inferior de la Formación Rancho de Lata (Alvarez, 1996). Por encima y en discordancia angular se apoyan los depósitos marinos, de la Formación Los Patillos, de edad pliensbachiana superior a caloviana media y la Formación La Manga, de edad caloviana inferior a oxfordiana media-superior; ambas de ambiente de postrift (Álvarez, 1996). Sin relación estratigráfica se encuentra la Formación Auquilo constituida por yesos con textura sacaroide y localizado sobre la falla Pelambres en el río Carnicería. Sobre la Formación La Manga y en discordancia, continúan los depósitos continentales del Jurásico superior de la Formación Tordillo; desarrollados en una cuenca de intraarco, asociados a un régimen extensional y que marcan la culminación del ciclo jurásico en la región (Cristallini y Ramos, 1996). Continúa las secuencias cretácicas con depósitos volcánicos y volcanoclásticos

continentales de la Formación Cristo Redentor. Están formados por una alternancia de coladas andesíticas, ignimbritas dacíticas, conglomerados clasto sostenido y areniscas rojas. Estos depósitos se disponen en una faja que bordea la margen occidental del río Santa Cruz, formando amplios anticlinales y sinclinales con rumbo septentrional, extendiéndose sobre el límite argentino-chileno hasta $\sim 37^\circ\text{LS}$. Los depósitos terciarios con poco desarrollo corresponden a un pórfiro dacítico vinculado con un halo de alteración hidrotermal y a la mineralización de los yacimientos de El Pachón y Los Pelambres (Fernández *et al.*, 1974).

Otras zonas de alteración han sido identificadas y localizadas en terreno, en la ladera occidental de la cordillera de Santa Cruz y en el río La Coipa (**Figura 2**). Una cuarta zona de alteración hidrotermal, denominada Altares (ver figura 2), también ha sido identificada en el extremo noroeste de la zona de estudio, y que corresponde a un sistema de mineralización de alta sulfuración vinculado a un sistema de pórfido cuprífero (Almandoz, et al., 2005).

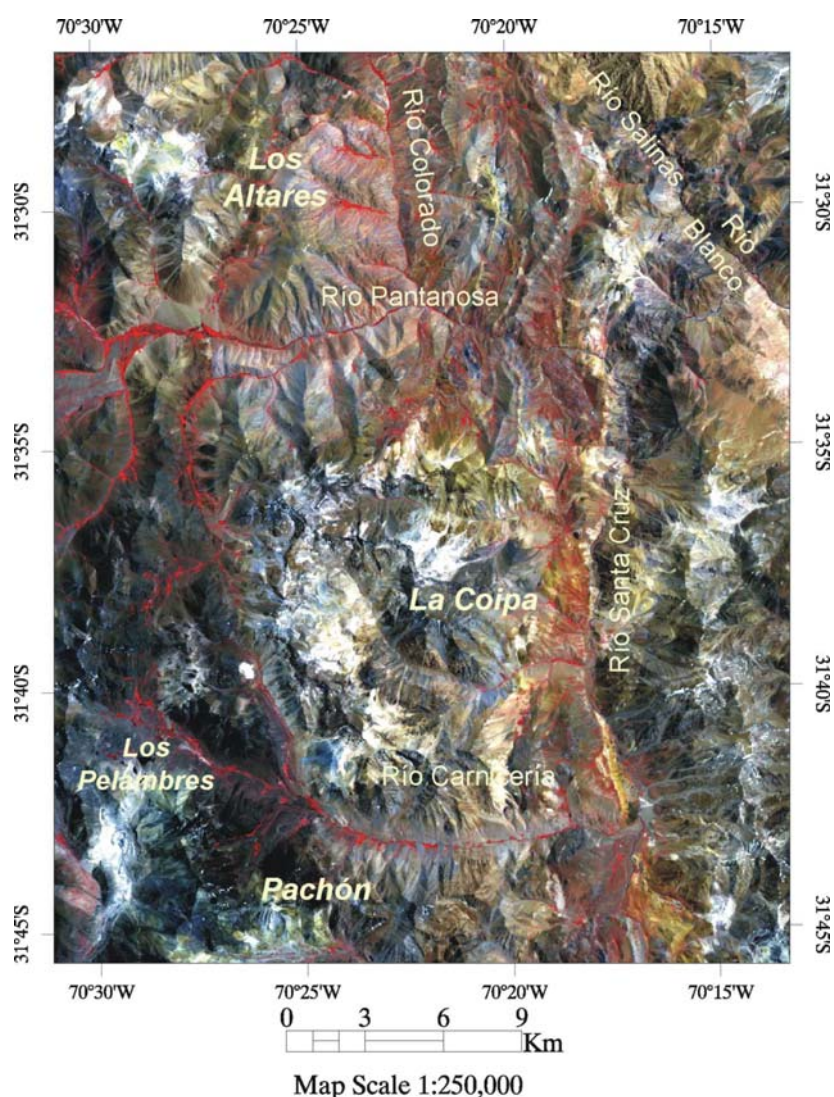


Figura 2. Imagen ASTER 321 RGB, con los yacimientos y prospectos clasificados.

3. Estructura

El área de estudio presenta dos estilos estructurales; uno pre-andico de piel fina (*thin skinned*) y otro andico de piel fina (*thin skinned*) y piel gruesa (*thick skinned*) (D'Odorico *et*

al., 2006). El estilo pre-andico habría sido el responsable de la fuerte deformación en la cobertura sedimentaria mesozoica, formando anticlinales y sinclinales en las secuencias cretácicas del Cordón del Yunque y del Límite. El estilo estructural ándico, muestra una deformación de piel gruesa que afecta a los bloques de basamento de la cordillera de Santa Cruz la que es levantada por una falla de alto ángulo ubicada al este de dicha cordillera.

La porción central de la comarca o bloque Mondaca es levantada por la falla Mondaquita de alto ángulo, por sobre los estratos mesozoicos previamente descritos. El estilo de piel fina puede verse en el río Carnicería, mediante el corrimiento Pelambres de bajo ángulo, que afecta la Formación Los Pelambres, previamente deformada, la que constituye una estructura fuera de secuencia.

4. Sensores Remotos

Diferentes técnicas de procesos con datos digitales satelitales, como composiciones color RGB, clasificación supervisada y cocientes de bandas, pueden discriminar minerales en rocas con alteraciones hidrotermales. Además y mediante la aplicación de muestreos y espectros con PIMA (**Tabla 2**), se pueden obtener información para ser aplicada luego en procesos de datos de imágenes, lo cual permite mapear zonas de alteración hidrotermal.

La región del río Santa Cruz y en general de Cordillera Frontal a estas latitudes, es una región árida y con poca o nada ninguna cobertura vegetal, lo cual favorece ampliamente el uso de datos satelitales en la identificación de minerales asociados a depósitos con interés económico. En el presente trabajo se aplicaron técnicas de procesamiento de datos satelitales con la finalidad de mapear diferentes unidades geológicas además de identificar zonas de alteración hidrotermal.

5. Procesamiento y metodología

Se utilizó la imagen ASTER L1B, de fecha 21 de enero de 2001, a la cual se le aplicaron los siguientes pre-procesamientos. 1) corrección del efecto Crosstalk (Iwasaki *et al.*, 2001) con el programa de ERSDAC (2001a) corrección por radiancia; 3) corrección atmosférica con lo cual se obtuvieron los datos en reflectancia aparente. Luego se realizó un recorte (**Figura 2**) de la zona de interés y se realizaron los siguientes procesamientos.

5a. Combinaciones de bandas

Se combinaron bandas a fin de realizar una primera interpretación foto geológica de la región. La combinación 321 (RGB) permitió identificar y correlacionar diferentes litologías con mapas preexistentes. La combinación 654 (RGB), dio una primera identificación regional de posibles zonas de alteración hidrotermal (**Figuras 3 y 4**).

5b. Cocientes de bandas

Debido a que las respuestas espectrales de las rocas en muchos casos son similares, no siempre es posible discriminar litologías con interpretación fotogeológica a partir de composiciones color de bandas. Por lo cual se utilizaron cocientes de bandas del SWIR para la discriminar zonas de alteración hidrotermal ya que estas presentan picos de absorción y de reflectancia característicos en esta región del espectro electromagnético (Yamaguchi, 1987). La combinación de cocientes 4/5, 4/6, 4/7 (RGB) permitió identificar zonas de alteración hidrotermal (**Figura 4**).

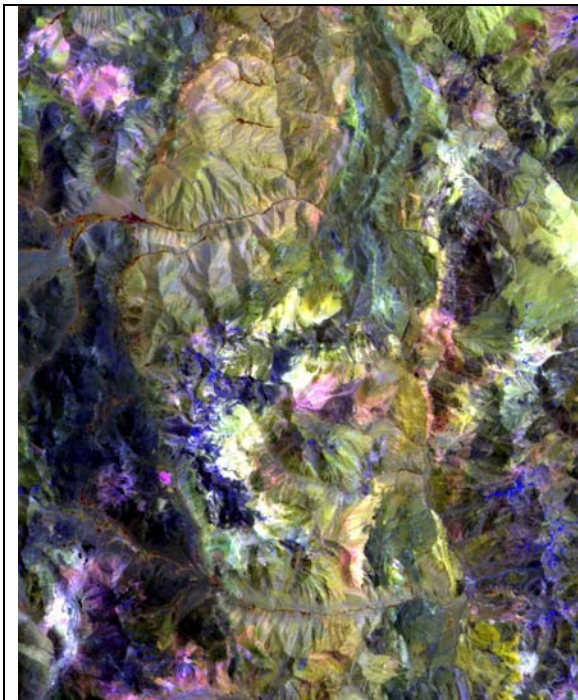


Figura 3: composición color 641 RGB.

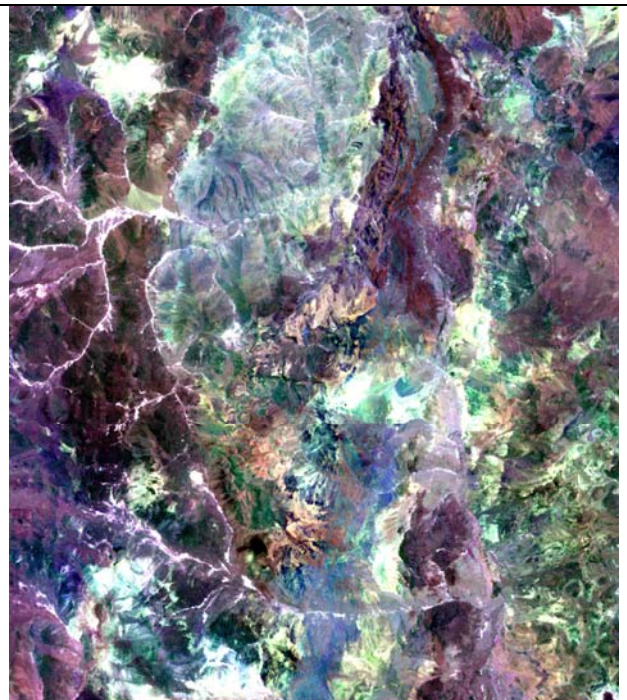


Figura 4: cocientes 4/5, 4/6, 4/7 (RGB)

5c. Índices de Ninomiya - SWIR

Minerales como montmorillonita y sericita presentan picos de absorción en la banda 6 de ASTER, mientras que la pirofilita presenta un pico de absorción característico en la banda 5. Por su parte la caolinita y alunita presentan picos de absorción característicos en las bandas 5 y 6. Sobre esta base se realizó la estimación cualitativa de la presencia de dichos minerales utilizando los índices definidos por Ninomiya (2004).

- OHI (a): $(\text{banda } 4 * \text{banda } 7) / (\text{banda } 6 * \text{banda } 6);$
- OHI (b): $(\text{banda } 4 * \text{banda } 7) / (\text{banda } 5 * \text{banda } 5);$
- ALI: $(\text{banda } 7 * \text{banda } 7) / (\text{banda } 5 * \text{banda } 8).$

El índice OHI(a) identifica minerales que presentan picos de absorción en la banda 6 mientras que el índice OHI(b) permite la identificación de minerales que presentan picos de absorción en la banda 5; el índice ALI permite distinguir alunita por su pico de absorción en la banda 8 (Ninomiya, 2004). Aplicando estos índices se puede distinguir minerales o grupos minerales de alteración en base a sus características espectrales (**Figuras 5 y 6**).

5d. Clasificación de minerales de alteración – SAM

Se realizó la clasificación supervisada por el método *Spectral Angle Mapper* (SAM), el cual consiste en la determinación de similitud entre dos espectros, uno el del píxel de la imagen y otro el patrón espectral de referencia del mineral de interés (Kruse *et al.*, 1993). El algoritmo determina la similitud espectral calculando el ángulo de mejor aproximación y considerando a ambos vectores. Esta técnica, cuando es utilizada con datos calibrados a reflectancia, es relativamente insensible a efectos de iluminación y albedo. Se utilizó una base de datos espectrales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (speclib4).

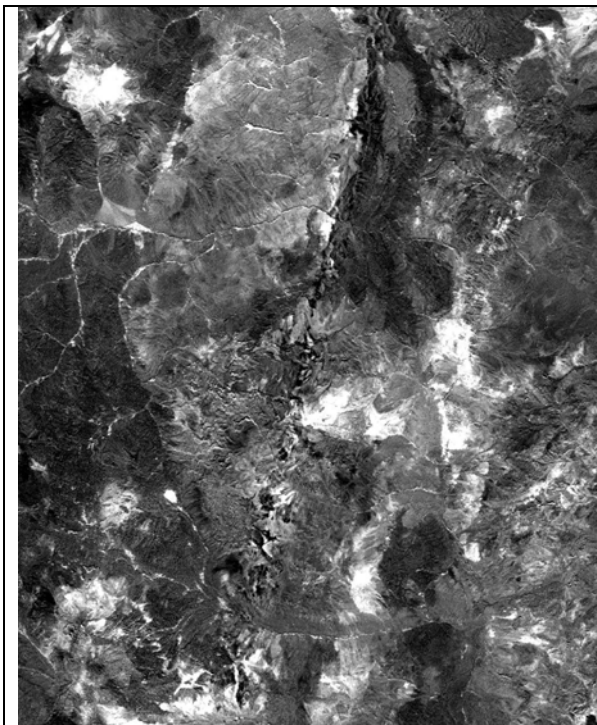


Figura 5: índice OHI (a)

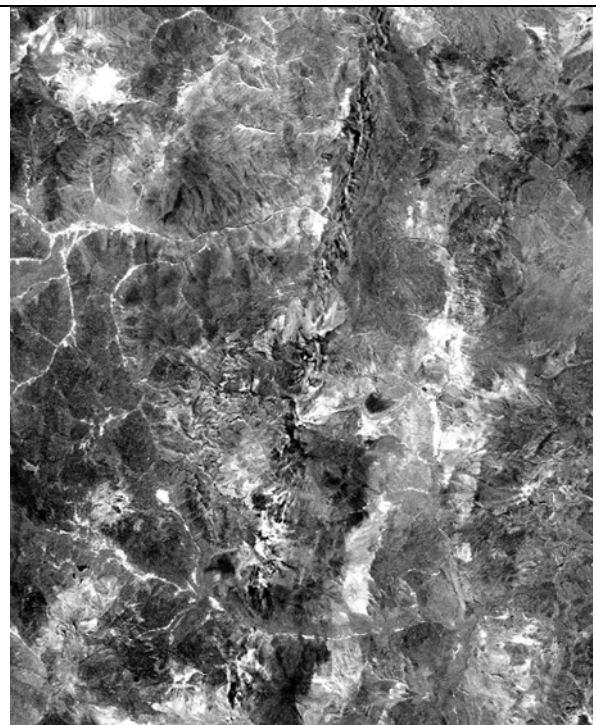
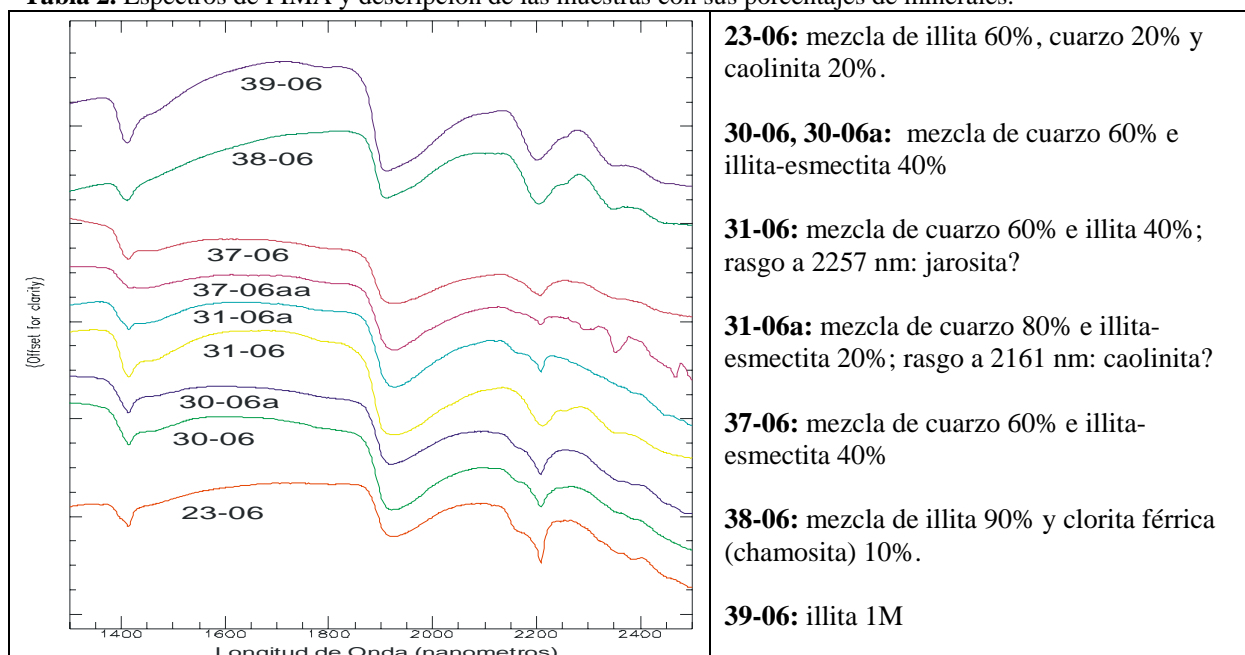


Figura 6: índice OHI (b).

Se midieron las muestras colectadas en el campo con espectrómetro PIMA (*Portable Infrared Mineral Analyzer*), los cuales permitieron conocer los minerales de alteración (Ver tabla 2). Con estos espectros, y tomando como base la librería espectral del USGS (*Speclib4*), se realizó la mezcla de los siguientes minerales: illita, caolinita, jarosita, cuarzo y clorita. Con esta base se realizó la identificación y clasificación de esos minerales de alteración hidrotermal en base a esas mezclas. Este proceso permitió identificar mezcla de esos minerales en las regiones de Altares, La Coipa, Pachón y Pelambres (**Figuras 7 y 8**).

Tabla 2. Espectros de PIMA y descripción de las muestras con sus porcentajes de minerales.



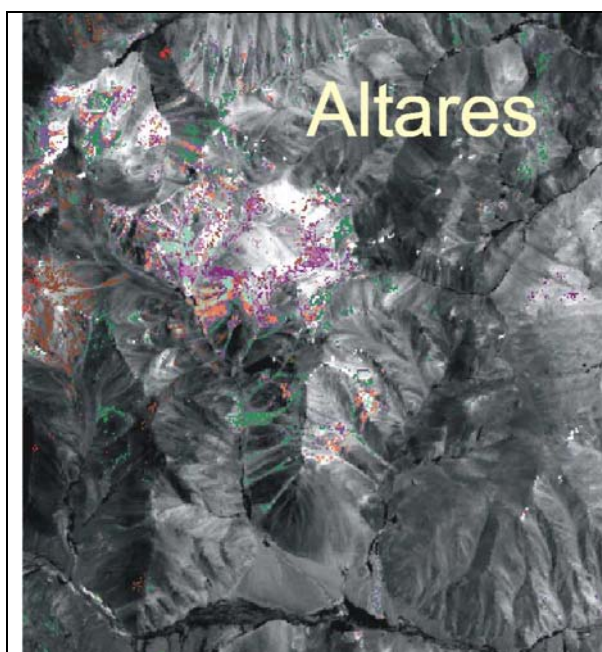


Figura 7: clasificación SAM.

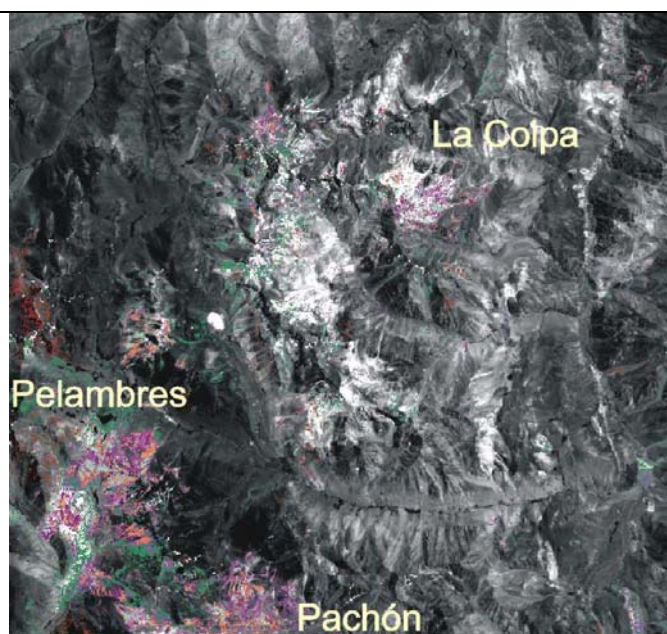


Figura 8: clasificación SAM

6. Resultados

- La combinación de bandas 321 (RGB) permitió identificar y correlacionar diferentes litologías mientras que las combinaciones 654 y 641 (RGB), muestrearon la primera identificación regional de posibles zonas de alteración hidrotermal.
- Los índices OHI (a) y (b), permitieron estimar cualitativamente los minerales de alteración.
- La clasificación SAM identificó minerales de alteración como los anteriormente descritos dentro de las zonas interpretadas como de alteración hidrotermal, en las combinaciones y en los índices.
- La interpretación de minerales involucrados en el espectro obtenido con PIMA permitió acotar la cantidad de minerales a clasificar, la estimación de su porcentaje y la verificación de los resultados obtenidos.

7. Conclusiones

Los procesamientos de datos ASTER L1B corregidos a reflectancia, permitieron identificar y clasificar cuatro zonas bien delimitadas, que presentan una mineralogía relacionada con procesos de alteración hidrotermal. Dos de estas zonas corresponden a los yacimientos de Pachón y Pelambres, actualmente en desarrollo; una tercera zona de alteración hidrotermal denominada Altares, correspondiente a un sistema de mineralización de alta sulfuración vinculado a un sistema de pórfido cuprífero (Almandoz, *et al.*, 2005); y una cuarta zona actualmente en estudio denominada La Coipa, la cual estaría vinculada genéticamente a los depósitos antes mencionados (D'Odorico, en preparación).

Agradecimiento

Los autores desean agradecer a la Universidad de Buenos Aires y el Servicio Geológico Minero Argentino por el apoyo brindado. A Graciela Marín por la lectura y comentarios sobre el trabajo. A Río Tinto Exploration por el apoyo y financiación en los trabajos de campo. Trabajo financiado en parte por UBACYT-X160.

7. Referencias

- Almandoz, G., Zulliger, G., Márquez-Zavalía, F., 2005. Altar: mineralización de alta sulfuración vinculada a un sistema de pórfido cuprífero, San Juan, Argentina. XVI Congreso Geológico Argentino, ACTAS: 369-376, La Plata.
- Alvarez, P.P., 1996. Los depósitos triásicos y jurásicos de la Alta cordillera de San Juan. En Ramos et al. (1996). Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza. Subsecretaría de Minería de la Nación. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Anales 24 (5): 59-137, Buenos Aires.
- Cahill, T. y Isacks, B.L. (1992). Seismicity and Shape of the Subducted Nazca Plate. *Journal of Geophysical Research*, V.97(B12): 17503-17529.
- Cristallini, E.O. y Ramos V.A., 1996. Los depósitos continentales cretácicos y volcánicas asociadas. En Geología de la región del Aconcagua, provincias de San Juan y Mendoza. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Anales 24: 231-274, Buenos Aires.
- D'Odorico P.; Sequeira N. y Pérez, D. J., 2006. Geología del curso medio del río Santa Cruz, Andes principales (31°45' LS) San Juan, Argentina. XI Congreso Geológico Chileno, Antofagasta. Actas: Vol 2, 193-196.
- D'Odorico, 2006. Geología de la región media del río Santa Cruz. Trabajo Final de Licenciatura, Departamento de ciencias geológicas, FCEN, UBA (en preparación).
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), 2001. ASTER User's Guide part I. Tokio.
- Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC), 2001a. Crosstalk Correction Software – User's Guide. Tokyo, 16 p.
- Fernández, R.R., Brown, R.F., Lencinas, A.N., 1974. Pachón, un nuevo pórfido cuprífero argentino, Departamento de Calingasta, provincia de San Juan, República Argentina. Actas Vº Congreso Geológico Argentino, 2: 77 - 89.
- Green, A.A. y Craig, M.D. 1985. "Analysis of aircraft spectrometer data with logarithmic residuals," JPL Publication 85-41, pp. 111-119.
- Iwasaki, A.; Fujisada, H.; Akao, H.; Shindou, O. y Akagi, S., 2001. Enhancement of Spectral Separation Performance for ASTER/SWIR. In: 47th Annual Meeting SPIE, Vol. 4486, pp. 42-50, San Diego, USA.
- Kruse, F. A., Lefkoff, A. B., Boardman, J. B., Heidebrecht, K. B., Shapiro, A. T., Barloon, P. J., and Goetz, A. F. H., (1993), "The Spectral Image Processing System (SIPS) - Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data". *Remote Sensing of the Environment*, v. 44, p. 145 - 163.
- Ninomiya, Y., Matsunaga, T. y Yamaguchi, Y. 1997. Estimation of SiO₂ content using simulated TIR remote sensing data generated from spectra measured on the sawed surfaces of rocks at Cuprite, Nevada, USA. *Proc. 30 th Int.Geol. Cong.* Vol. 10:49-62.
- Ninomiya, Y. y B. Fu. 2001. Spectral Indices for Lithologic Mapping with ASTER Thermal Infrared Data Applying to a Part of Beishan Mountains, Gansu, China. Institute of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS, Sydney, Australia.
- Ninomiya, Y. 2002. Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. *International Society for Optical Engineering SPIE*, vol. 4710, pp. 191-202.
- Ninomiya, Y. 2004. Lithologic mapping with multispectral ASTER TIR and SWIR data. *Proceedings of SPIE*, 5234, 180-190.
- Pérez, D.J., y Ramos, V.A., 1996. El basamento prejurásico, en Ramos et al., Geología de la Región del Aconcagua, Provincias de San Juan y Mendoza, Subsecretaría de Minería de la Nación, Dirección del Servicio Geológico. Anales 24 (4): 27-58, Buenos Aires
- Ramos, V.A., Aguirre Urreta, M.B., Lencinas, A., 1993. El Toarciano fosilífero de Pachón y su relación con el Jurásico de Cordillera Principal de San Juan. Actas 12º Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 2: 94 - 104. Buenos Aires.
- Yamaguchi, Y. 1987. Possible techniques for lithologic discrimination using the short wavelength infrared bands of the Japanese ERS-1.

* * *