

Cartografía de formaciones geológicas litológicamente similares en zonas llanas cultivadas

A. Ríaza, R. Mediavilla, J.I. Santisteban

Instituto Tecnológico Geominero de España

RESUMEN

Los estudios espectrales de laboratorio en el visible y el infrarrojo cercano (400-2500 nm) sobre muestras de rocas de distintas formaciones geológicas detríticas siliciclásticas en una cuenca sedimentaria terciaria, sugieren que la proporción de carbonatos y su composición, así como la de la fracción arcillosa y la presencia de óxidos e hidróxidos de hierro, es responsable de las sutiles diferencias en las respuestas espectrales de las mismas. La presencia de cemento carbonatado en areniscas y conglomerados con cantos metamórficos, y de costras carbonatadas intrasedimentarias facilita la expresión de distintas unidades en imágenes. Dos alteraciones ferruginosas cronológicamente sucesivas pueden distinguirse en las imágenes superpuestas a los demás acontecimientos geológicos.

ABSTRACT

The presence of carbonate of different composition, clays and iron oxides and hydroxides are responsible for the subtle differences on the spectral response of various geological units of tertiary age lithologically homogeneous, shown by laboratory spectra in the visible and the nearinfrared. Carbonate cement in sandstones and conglomerate with metamorphic boulders, and intrasedimentary carbonate crusts favour the expression of different units on the imagery. Two chronological stages of late iron alteration can be distinguished overlying prior geological events.

Introducción

Las cuencas terciarias ocupan aproximadamente la cuarta parte de la superficie de la Península Ibérica. En ellas afloran formaciones geológicas detríticas no consolidadas con litología muy homogénea en un relieve de llanura que se cultiva habitualmente en parcelas de tamaño muy pequeño. El paisaje está caracterizado por formas suaves constituidas por amplios replanos escalonados y dos zonas de escarpes relacionadas con valles fluviales. Los cursos de agua están controlados estructuralmente, en forma de valles de eje rectilíneo paralelos entre sí y codos y confluencias en ángulo anómalos.

El Terciario dentro de la zona de estudio (hoja nº 452, La Vellés, del Mapa Geológico Nacional a escala 1:50.000) se sitúa en la extremidad sudoccidental de la

Cuenca del Duero y está representado por materiales siliciclásticos, fundamentalmente conglomerados y arenas, y escasos niveles carbonatados. El relleno se puede dividir en tres megaconjuntos (Mediavilla, in litt.; Santisteban et al., in litt.), divididos en varias unidades tectosedimentarias (figs. 1, 2), en función de su relación con las principales fases de generación del relieve de los bordes de la cuenca. El clima durante todo el Terciario evolucionó desde tropical húmedo a mediterráneo, dejando su huella en los sedimentos en la mineralogía de las arcillas.

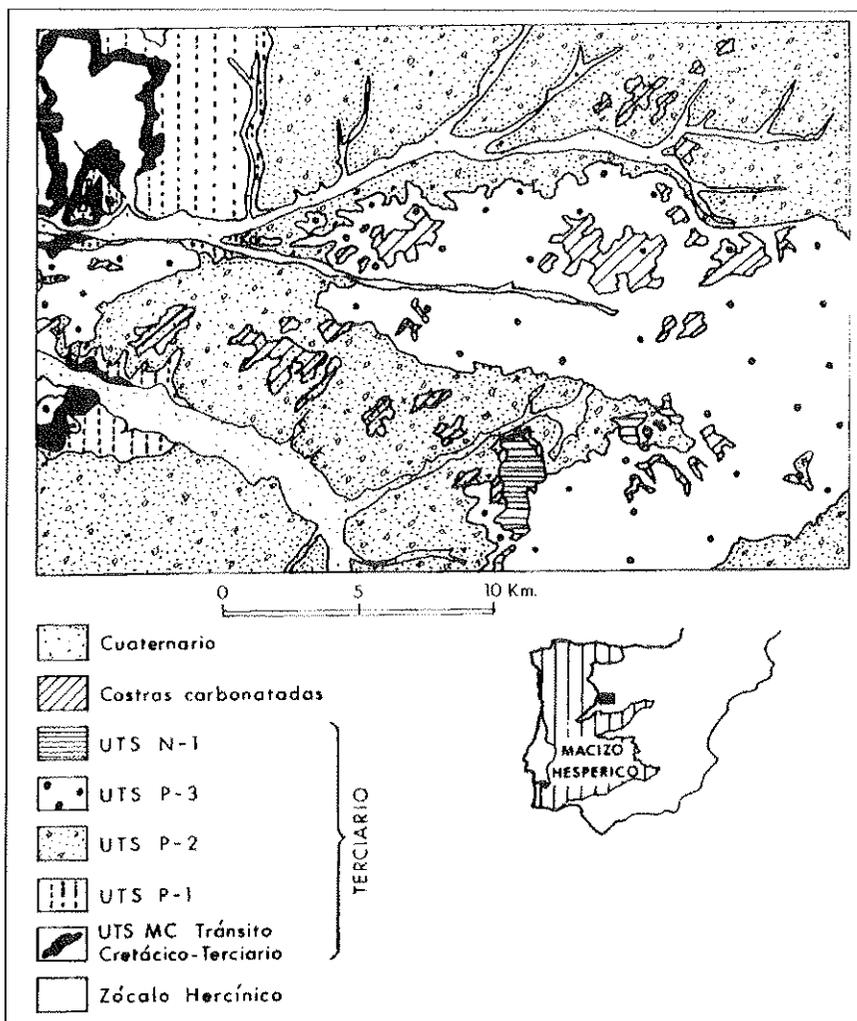


FIGURA I
Mapa geológico del área de estudio (in Mediavilla, in litt)

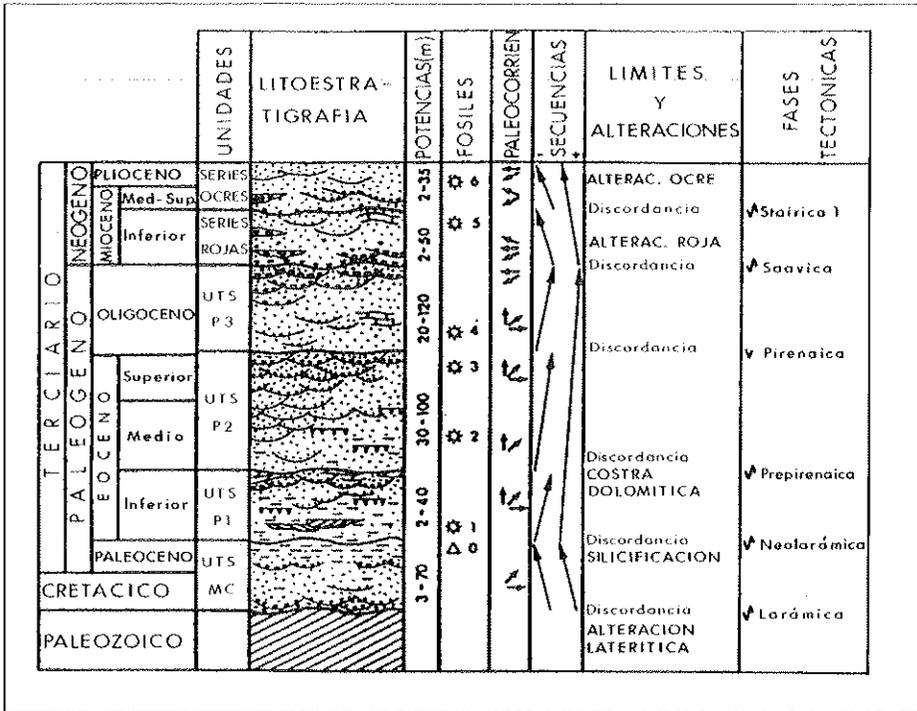


FIGURA 2

Columna estratigráfica para el SO de la Cuenca del Duero (in Santisteban et al, in litt)

Las imágenes de satélite en el visible e infrarrojo cercano (0.42.5 μm) se han utilizado de manera convencional en la cartografía de alteraciones hidrotermales relacionadas con depósitos minerales (Prost, 1980; Podwysocki et al, 1983). Estos mismos minerales se producen por procesos de meteorización en superficies expuestas a la acción de los agentes atmosféricos, generándose distintas arcillas en función de las condiciones climáticas.

Propiedades espectrales de sedimentos y materiales alterados

Los minerales arcillosos han acaparado gran atención en los estudios espectrales de laboratorio e imágenes (Hunt y Salisbury, 1970,1973). Todas las arcillas contenidas en las alteraciones y los sedimentos a cartografiar presentan una fuerte absorción de energía electromagnética en 2200 nm, a excepción de la atapulgita (fig. 3A). Con la excepción de la caolinita, presentan también absorciones acusadas en 1900 nm. La caolinita, sepiolita y atapulgita ofrecen varios mínimos de menor importancia entre

2200 nm y 2300 nm, que no aparecen en la respuesta espectral de la montmorillonita ni la illita.

La goethita, como todos los compuestos ferruginosos, muestra sus rasgos característicos en el visible (Hunt y Salisbury, 1971b), en un mínimo en 475 nm, una caída brusca hacia el azul desde las longitudes de onda más altas del visible, y una amplia depresión entre 800 y 1200 nm. Sin embargo, no desarrolla las bandas de absorción en el infrarrojo típicas de la presencia de iones OH⁻. De igual modo, el tamaño de grano en óxidos e hidróxidos influye en la reflectancia global de modo opuesto a los materiales silicatados, disminuyendo con el tamaño de grano.

Los carbonatos presentan una absorción no muy estrecha en 2300 nm, además de otras depresiones menores entre 1800 y 2000 nm (Hunt y Salisbury, 1971a) (fig. 3B). Estas absorciones permiten distinguir las áreas carbonatadas de aquellas en que predomina la sílice.

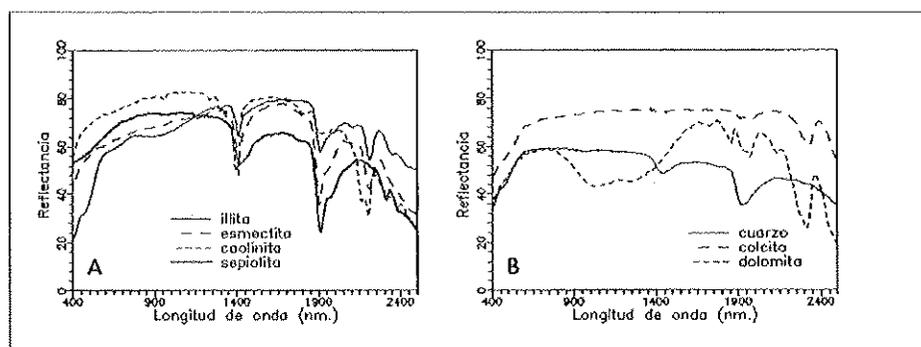


FIGURA 3

Medidas espectrales en A: diversos minerales arcillosos; B: carbonatos y cuarzo (procedentes de la espectroteca del Servicio Geológico de Estados Unidos)

Para orientar el tratamiento de imágenes se han tomado medidas espectrales en el laboratorio en el visible y el infrarrojo cercano (400-2200 nm) con un espectrofotómetro provisto de esfera integradora y resolución espectral de 1nm que registra reflectancia difusa respecto a un patrón de sulfato de bario, sobre 80 muestras correspondientes a diferentes unidades litológicas sólo sometidas a secado por exposición al aire y tamizado por un tamiz de 2 mm de luz.

Reflectancia en suelos y material consolidado

Los materiales de las cuencas terciarias estudiados no están consolidados en su mayor parte. Sólo las costras carbonatadas a techo de las unidades arcóscicas, y parte

1 Presentado en la V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Las Palmas (Gran Canaria), 10-12 noviembre 1993.

de las alteraciones silíceas son duros. Por ello, la respuesta espectral ofrecida por la generalidad de las rocas expuestas en superficie se asimila a la de un suelo (fig. 5A).

Las alteraciones silíceas son muy distintivas en imágenes, tanto por su elevada reflectancia global como por la expresión geomorfológica de los materiales duros. En estos materiales duros, las depresiones en 1400, 1900 y 2200 nm son característicamente asimétricas con hombros en 1350, 1380, 1390 nm (fig. 4). Con frecuencia, los materiales duros silicificados también están ferruginizados. En ellos, las depresiones en 475 y 550 nm acompañan a una depresión más amplia pero acentuada centrada en 900 nm por la presencia de hierro.

La presencia de carbonatos, sea en costras o como cemento (U.T.S. P2) deprime la reflectancia global, a pesar de ser materiales de color más claro visualmente que el resto, además de suavizarse la absorción en 2200 nm (fig. 5A). Los cantos carbonatados, muy abundantes como material suelto en superficie en las zonas en que existen costras carbonatadas, ofrecen como rasgo más distintivo una fuerte absorción en 2350 nm, y la casi inexistencia de absorción en 2200 nm (fig. 5B). Esto sólo se traduce en las muestras de suelos en la mitigación de la absorción en 2200 nm. El color blanco de estos cantos produce una reflectancia global muy alta, que influye en la respuesta espectral de estas zonas registrada desde plataformas elevadas.

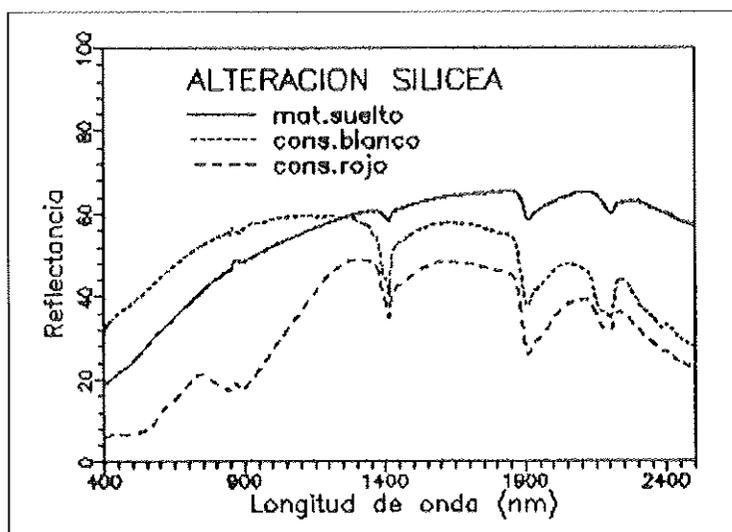


FIGURA 4

Medidas espectrales sobre materiales afectados por la alteración silícea paleocena (fig. 2), con expresión de diferencias entre el material suelto y el material endurecido de tonos blanco y rojizo

La alteración roja del mioceno inferior con óxidos de hierro y esmectita, y las Series Rojas (U.T.S. N1) depositadas en la misma época son muy próximas a las costras carbonatadas en reflectancia global, aunque se distinguen en las absorciones típicas del hierro en el visible en los materiales rojos, y la absorción mitigada en 2200 nm en los carbonatos (fig. 6B). A diferencia de las imágenes, las alteraciones ocre del plioceno con hidróxidos de hierro y caolinita, presentan una reflectancia más alta que las rojas, pero el umbral en 475 nm es más acentuado en las ocre que en las rojas (fig. 6A).

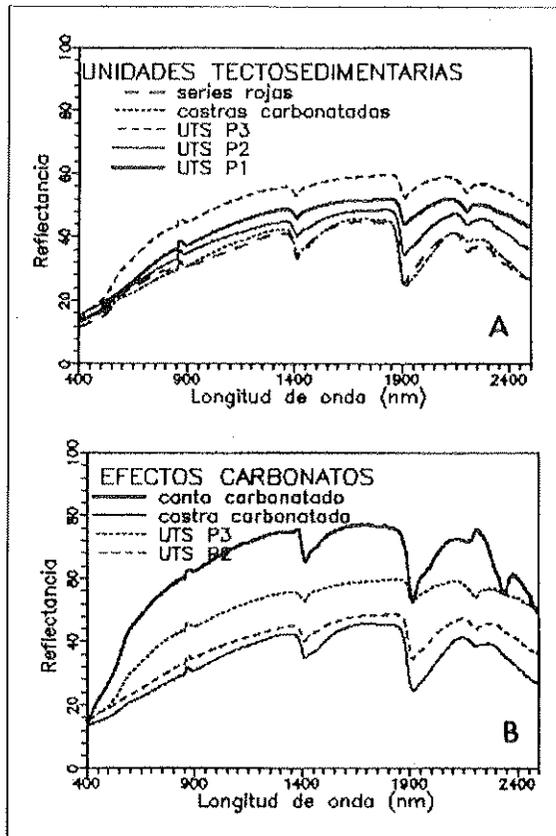


FIGURA 5

A: Medidas espectrales sobre los materiales no consolidados de las distintas unidades tectosedimentarias que afloran en el área de estudio, incluidas las costras carbonatadas a techo de las U. T.S. P2 y P3. B: Medidas espectrales en las unidades tectosedimentarias sobre las que se desarrollan costras carbonatadas, con expresión de la respuesta espectral de los cantos procedentes de material endurecido, así como de material no consolidado

Expresión de formaciones geológicas en imágenes

Para extraer posibles diferencias litológicas, se ha tratado digitalmente una imagen Thematic Mapper 202-032-1 del 28 de agosto de 1985 con el objeto de que la vegetación esté en su estado de menor pujanza. Se han realizado correcciones atmosféricas por el procedimiento de sustracción de valores de absorciones mínimas (Fraser, 1990), y el de intersección de regresiones (Crippen, 1987), que mostró mejores resultados para cartografiar distintas unidades litológicas. Las zonas más densamen-

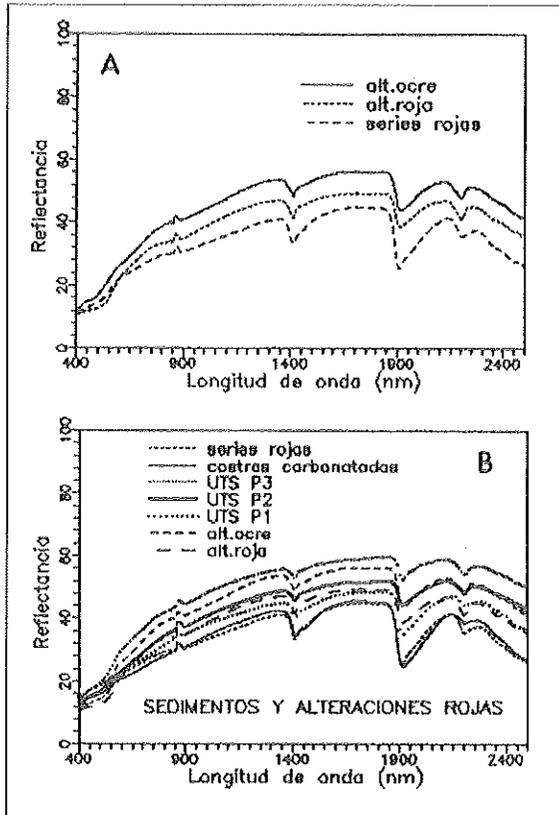


FIGURA 6

A: Medidas espectrales de los materiales ferruginosos no consolidados, tanto sedimentos (series rojas) como superficies alteradas. B: Medidas espectrales de unidades tectosedimentarias y alteraciones rojas miocenas y ocreas pliocenas posteriores al depósito de todas ellas

te recubiertas por vegetación se enmascararon tomando valores en el cociente entre el infrarrojo cercano y el rojo (4/3) (Elvidge y Lyon, 1985).

El examen inicial sobre una composición en falso color con las bandas 4, 7 y 5 (ARV) revela la gran llanura cubierta de campos cultivados que abarca la mayor parte del área de estudio, y dos zonas occidentales topográficamente más elevadas ocupadas por dehesas.

El análisis de componentes principales calculadas sobre las seis bandas del visible y el infrarrojo cercano de las imágenes thematic mapper en las que se ha enmascarado la vegetación, compartimenta el área de estudio en cuatro zonas geológicamente significativas. En la composición en falso color con las componentes principales 2, 4 y 3 (ARV), se esbozan las zonas más extensas de alteraciones ferruginosas y de sedimentos de las Series Rojas (U.T.S. N1), aunque permanece muy homogénea la zona ocupada por las U.T.S. P2 y P3. La composición en color con las componentes de orden más avanzado 4, 6 y 5 indica con mayor claridad estas mismas zonas.

Unidades Tectosedimentarias P1, P2 y P3

El uso de cocientes de bandas es habitual en la detección de diferencias espectrales en geología. Se seleccionaron grupos de cocientes de bandas que mostraban valores extremos para cada unidad cartográfica, y se realizaron clasificaciones por el algoritmo de máxima verosimilitud sobre los grupos de cocientes seleccionados. De las distintas clasificaciones así obtenidas se tomaron las clases mejor correlacionadas con la cartografía, y con ellas se compuso un mapa final por enmascaramiento sucesivo de unas sobre otras.

El cociente entre las bandas 5 y 7 se toma convencionalmente como indicativo de abundancia de arcillas. Una segmentación realizada sobre este cociente concentra los valores más altos en las U.T.S. P2 y P3.

La fragmentación espacial de la imagen por el pequeño tamaño de las parcelas de cultivo, y la heterogeneidad y mezcla en superficie de las unidades a cartografiar impide que una composición de color permita visualizar sus contactos o predominio de unas unidades sobre otras. Por ello se optó por delimitar parcelas de control sobre las distintas formaciones geológicas en la imagen en zonas descubiertas de vegetación, y su estudio cuantitativo en distintas combinaciones para definir digitalmente la litología del área de estudio. Así, se clasificaron inicialmente las seis bandas del visible y el infrarrojo cercano corregidas atmosféricamente por el método de sustracción de valores oscuros. Esta primera clasificación delimitó con cierta precisión las U.T.S. P2 y P3, así como las áreas de costras carbonatadas formadas por diagénesis tardía.

Acontecimientos diagenéticos tardíos. Series Rojas (U.T.S. N1)

Se toma el cociente 3/1 como representativo de la abundancia de material ferruginoso. Los valores más altos en manchas más homogéneas coinciden con zonas topográficamente elevadas con alteraciones ferruginosas más desarrolladas. Le acompaña un punteado fino de valores altos distribuidos por las zonas en que aflora la U.T.S. P2, además de algunas otras manchas mayores a lo largo del Arroyo de la Encina, donde se concentran los escasos afloramientos de las Series Rojas de edad miocena. El examen de otros cocientes que pueden indicar contenido en hierro, tales como 3/2 ó 4/1 (White et al, 1992), y el cálculo de componentes principales sobre ellos no ha aportado más precisión sobre su extensión superficial respecto al 3/1.

Tanto las alteraciones ferruginosas como las costras carbonatadas son acontecimientos tardíos que aparecen sobre las unidades arcóscicas depositadas anteriormente, y representan transformaciones mineralógicas que se disponen heterogéneamente en superficie. Las Series Rojas se depositan contemporáneamente a la alteración roja recogiendo materiales producto del desmantelamiento de las unidades anteriores. Por ello la respuesta espectral registrada por las imágenes reproduce esta disposición espacial fragmentada.

Un intento de clasificación sobre grupos de cocientes seleccionados por mostrar valores extremos en litologías correspondientes sobre bandas corregidas por el método de intersección de regresiones se mostró más eficaz a la hora de delimitar los afloramientos de alteraciones ferruginosas, y de las Series Rojas (U.T.S. N1) miocenas. Es de notar que haya que recurrir a los cocientes de bandas para cartografiar con un mínimo de precisión las alteraciones ferruginosas y las Series Rojas, que son tan evidentes en el campo, y imprimen una tonalidad uniforme roja a la llanura a simple vista, mientras que las diferencias sutiles en color y composición de las U.T.S. P2 y P3 predominan al examinar las bandas sin modificar.

El análisis cuantitativo de las parcelas de control en alteraciones ferruginosas bien desarrolladas muestra la existencia de dos familias bien separadas de valores. La alteración roja miocena se extiende por las dos U.T.S. P2 y P3 de modo generalizado, y se caracteriza por una composición de óxidos de hierro no hidratados y esmectita. Se desarrolla de modo preferente sobre la U.T.S. P2 constituida por conglomerados y arcosas con cemento carbonatado. La existencia de cemento carbonatado impide que los procesos de alteración profundicen, de modo que el tono rojo es más intenso en superficie que en la U.T.S. P3, donde hay mayor infiltración y los procesos de ferruginización se extienden en profundidad con mayor facilidad. Los espectros de laboratorio muestran una resistencia en las muestras con carbonato de la U.T.S. P2 a presentar absorciones típicas de minerales ferruginosos, de modo que las

imágenes no reflejan en este caso zonas en que la ferruginización es más intensa, sino las pátinas brillantes superficiales que aparecen al no poder profundizar los procesos de alteración.

La segunda alteración ferruginosa cartografiada se manifiesta en zonas más homogéneas y restringidas en extensión al N y SO. Corresponde a la alteración ocre pliocena formada en un clima más húmedo que la anterior con una mineralogía en la que predomina la goethita sobre los óxidos no hidratados de hierro y caolinita. Su situación geográfica coincide con la dirección de salida de drenaje de la cuenca hacia el oeste en el plioceno, en que se establece el basculamiento actual de la Cuenca del Duero hacia el Atlántico (Santisteban et al, in litt).

Las dos alteraciones ferruginosas roja y ocre muestran los valores más extremos en el conjunto de litologías examinadas en imágenes. La alteración roja miocena tiende a reflectancias altas en el conjunto, con valores próximos a las demás unidades sedimentarias (fig. 7). Sin embargo, la alteración ocre se separa espectralmente del conjunto de una manera notable hacia valores interiores que el resto. No son los cocientes convencionalmente utilizados para distinguir contenidos en hierro los que

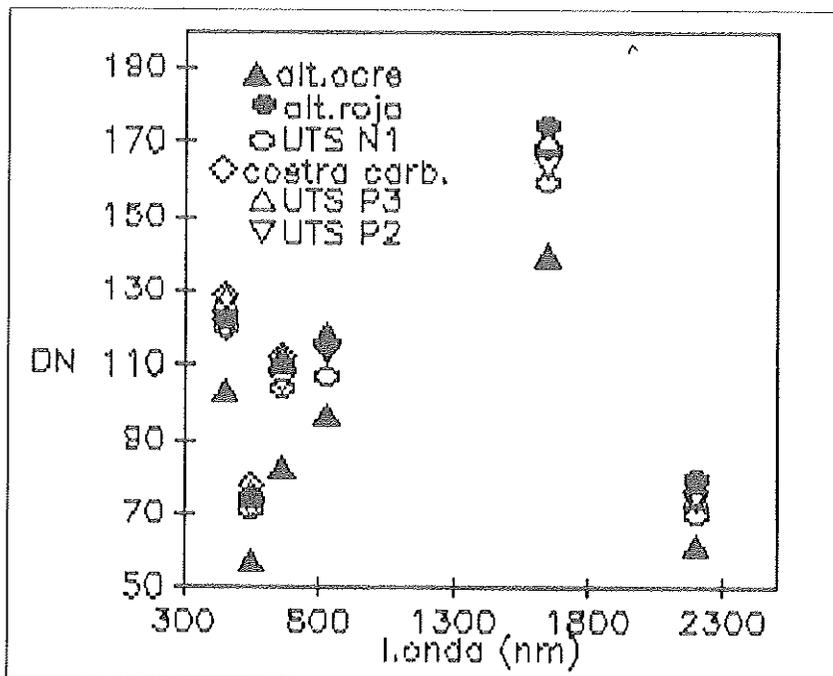


FIGURA 7

Números digitales procedentes de imágenes Thematic Mapper en parcelas de control situadas sobre las distintas unidades tectosedimentarias y alteraciones

diferencian mejor las dos alteraciones ferruginosas entre sí o del resto de las unidades geológicas en las imágenes, sino cocientes en los que participan el visible y el infrarrojo cercano.

Al resumir en una imagen única las clases obtenidas a partir de distintas series de datos por enmascaramiento sucesivo de unas sobre otras, el resultado varía según el orden de enmascaramiento (fig. 8). Si el proceso se realiza reproduciendo temporalmente los acontecimientos geológicos que representan las distintas unidades cartografiadas, se obtiene una imagen con un predominio en el espacio de las alteraciones ferruginosas y las Series Rojas, más parecido al aspecto actual del afloramiento. La extensión de las costras carbonatadas se oscurece con ello. De este modo, el tratamiento digital se convierte en un instrumento dinámico de reproducción de procesos geológicos y de modelización de la cartografía en superficie a lo largo del tiempo en cuencas sedimentarias cuyos bordes no han variado sensiblemente hasta la actualidad.

Las imágenes thematic mapper permiten distinguir distintas unidades litológicamente muy uniformes por ligeras diferencias en su composición y en los procesos de alteración por meteorización que se desarrollan sobre ellos.

La cementación por carbonatos permite distinguir las U.T.S. P2 y P3. Las costras carbonatadas intrasedimentarias a techo de las dos unidades también son cartografiables.

Existen dos etapas de alteración ferruginosa consecutivas en el tiempo que son diferenciables en imágenes. Su diverso comportamiento espectral obedece a la presencia de óxidos de hierro y esmectita en la alteración roja miocena y al predominio de hidróxidos de hierro y caolinita en la alteración ocre pliocena posterior.

La extracción digital de distintas unidades litológicas de diferentes series de datos obliga al enmascaramiento sucesivo para constituir un mapa final. La secuencia de enmascaramiento permite obtener mapas diferentes y utilizarse como instrumento de modelización de procesos geológicos en el tiempo en una cuenca sedimentaria cuyos bordes no han variado sensiblemente hasta la actualidad.

Bibliografía

Crippen, R.E.: 1986. "The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing", *Proc Fifth Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology*. Reno, Nevada, Sept 29-Oct 2: 407-416.

Elvidge, Ch.D. y Lyon, R.J.P.: 1985, "Estimation of the vegetation contribution to the 1.65/2.22 μ m ratio in airborne thematic mapper imagery of the Círginia Range, Nevada, *Int. Journal of Remote Sensing*, vol. 6, nº 1: 75-88.

Fraser, S.J.: 1991. "Discrimination of ferric iron oxides on satellite Thematic Mapper data: A

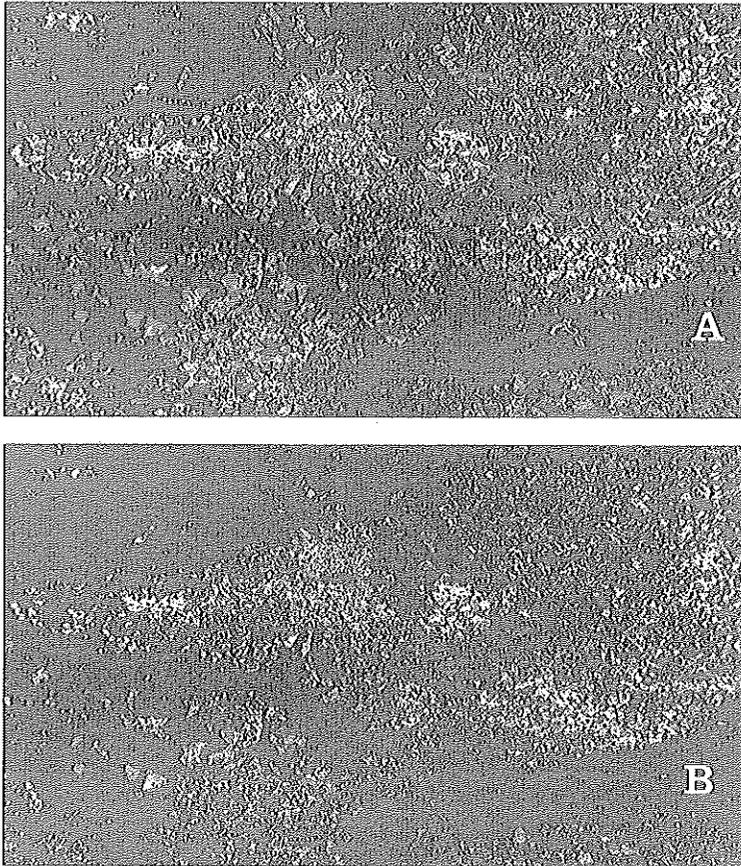


FIGURA 8

Mapa obtenido por el enmascaramiento sucesivo de distintas unidades geológicas procedentes de la clasificación de distintas series de datos obtenidos a partir de imágenes Thematic Mapper. Azul, UTS P2; amarillo, UTS P3; rojo oscuro, UTS N1; verde, costras carbonatadas; rojo vivo, alteraciones rojas; naranja, alteraciones ocreas. A: sin tener en cuenta la cronología de los acontecimientos geológicos. B: siguiendo en el proceso de enmascaramiento la cronología de los acontecimientos geológicos. (A. 95)

Mt. Newman case study”, *Proc. of Ailsll alian Remote Sensing Conference*, Perth, W Australia: 645-653.

Hunt, G.R. y Salisbury, J.W.: 1970. “Visible and Nearinfrared Spectra of Minerals and Rocks: I Silicate Minerals”, *Modern Geology*, 1: 283-300.

Hunt, G.R. y Salisbury, J.W.: 1971a. “Visible and Nearinfrared Spectra of Minerals and Rocks: II. Carbonates”, *Modern Geology*, 2: 23-30.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W. y Lenhof, J.: 1971b. “Visible and Nearinfrared Spectra of Minerals and Rocks: III Oxides and Hydroxides”, *Modern Geology*, 2: 191-205.

- Hunt, G.R., Salisbury, J.W. y Lenhof, J.:** 1973. "Visible and Nearinfrared Spectra of Minerals and Rocks: VI. Additional Silicates", *Modern Geology*, 4: 85-106.
- Mediavilla, R.:** *Memoria Mapa Geológico de España a escala 1:50.000 (2ª serie). hoja de La Vellés (nº 452)*, Publ. Instituto Tecnológico Geominero de España, in litt.
- Poswysocki, M.H., Segal, D.B. y Abrams, M.J.:** 1983. "Use of Multispectral Scanner Images for Assessment of Hydrothermal Alteration in the Marysvale, Utah, Mining Area", *Economic Geol.*, 78: 675-687.
- Prost, G.:** 1980. "Alteration Mapping with Airborne Multispectral Scanners", *Economic Geol.*, 75: 894-906.
- Santisteban, J.I., MartínSerrano, A., Mediavilla, R.M. y Dabrio, C.J.:** "SW Duero and Ciudad Rodrigo basins: Infill and dissection of a Tertiary basin". In Friend, P. and Dabrio, C.J. (eds.). *Tertiary Basins of Spain*. Cambridge University Press, in litt.
- White, K., Walden, J. y Rollin, E.:** 1992. "Remote Sensing of Pedogenic Iron Oxides using Landsat Thematic Mapper data of Southern Tunisia", *Proc. of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Un.Dundee, 15th-17th Sept. 1992: 179-187.

