

CARTOGRAFIA DIGITAL DE ROCAS EN EL AREA DE ALBUQUERQUE - LA CODOSERA, EXTREMADURA, UTILIZANDO IMAGENES LANDSAT THEMATIC-MAPPER

Carmen ANTON-PACHECO

Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid

RESUMEN

La clasificación digital de la información multispectral Landsat Thematic Mapper (TM), ha permitido diferenciar distintos tipos de suelos derivados de rocas metasedimentarias afectadas por metamorfismo de contacto en el área de Albuquerque-La Codosera. Este área, ubicada en el sector más meridional de la Zona Centro-Ibérica del Macizo Hespérico, y constituida por rocas precámbricas y paleozoicas en las que intruyen materiales graníticos, presenta mineralizaciones de Sn, W, Li, U, P y Au.

Dos clases de suelos, espectralmente bien diferenciadas, han sido establecidas en la aureola que produce el granito de Albuquerque en los materiales precámbricos en los que encaja. El muestreo y análisis mineralógico y de reflectancia espectral en laboratorio de suelos desarrollados sobre estos materiales, confirman las diferencias espectrales. El estudio petrográfico de las rocas del sustrato permite correlacionar estas clases con diferencias en el grado del metamorfismo térmico.

La extensión de la clasificación al área de La Codosera, en la que no se conocen materiales graníticos aflorantes, ha permitido localizar una zona donde suelos derivados de pizarras Devónicas presentan las mismas características espectrales que los suelos situados en la aureola de metamorfismo. El estudio petrográfico de las rocas subyacentes demuestra que han sido afectadas por metamorfismo térmico, lo que permite suponer la existencia de un cuerpo granítico en profundidad.

Un tercer grupo de suelos desarrollados sobre pizarras, cuarcitas y rocas carbonatadas muy enriquecidas en Fe, y a las que se asocian importantes anomalías geoquímicas de Au, han sido, asimismo, discriminados en base a sus características espectrales.

Palabras clave: Imágenes Landsat TM, Clasificación digital, Metamorfismo de contacto, Suelos limoníticos.

ABSTRACT

Digital classification of Landsat Thematic Mapper (TM) data allows the discrimination of two spectrally different types of soils within the northern contact aureole of the Albuquerque pluton. Mineralogical and laboratory reflectance analysis of the soils confirms these spectral differences. Petrological studies of the underlying rocks indicate that the two classes are related to rocks affected by a different grade of contact metamorphism.

Extension of the digital classification over the whole Albuquerque-La Codosera area has located a sector where soils derived from Devonian slates present the same spectral characteristics as the soils within the contact aureole. Thin section of the bedrock shows that these materials have been affected by contact metamorphism, indicating the possible existence of an intrusive body in depth.

An additional class, ascribed to soils derived from iron-rich Devonian slates, quartzites and carbonates, has been detected in an area where major Au geochemical anomalies are found.

Key words: Landsat TM, Digital classification, Contact metamorphism, Limonitic soil

1. INTRODUCCION

El presente estudio forma parte de un proyecto de investigación para el desarrollo de nuevas técnicas multidisciplinares en la exploración minera de varias áreas del oeste peninsular, realizado conjuntamente por el I.T.G.E. y la Universidad de Southampton, y cofinanciado por la CEE (MA1M-0032-C(A)).

Los datos multiespectrales Landsat TM proporcionan una información muy útil para diferenciar suelos y rocas en base a la presencia de determinados minerales en su composición. La buena resolución espacial y radiométrica de estos datos permite detectar las sutiles manifestaciones superficiales que con frecuencia se asocian a las litologías y alteraciones que caracterizan el ámbito de deposición de ciertos yacimientos minerales.

Las medidas de reflectancia espectral de suelos y rocas se realizan en estudios de teledetección aplicados a geología, con objeto de caracterizar determinados minerales que forman parte en la composición mineralógica de los mismos e interpretar adecuadamente los datos multiespectrales registrados por los sensores. En la región del visible, los procesos electrónicos que se dan en los metales de transición, tales como el hierro y el manganeso, producen rasgos de absorción que caracterizan las curvas de reflectancia de los materiales que contienen estos minerales (Hunt, et al., 1971; Rowan, et al., 1974). Los procesos vibratorios que se producen en los carbonatos y en los minerales que contienen grupos OH⁻, originan rasgos de absorción en la región del infrarrojo próximo (Hunt, et al., 1973). Este tipo de procesos constituyen la base para el estudio y caracterización espectral de rocas y suelos a partir de datos de teledetección.

Las diferentes respuestas espectrales que presentan los suelos expuestos en campos arados de áreas cultivadas, proporcionan una información muy valiosa para discriminar rocas afectadas por metamorfismo de contacto (Rowan, et al., 1987; Anton-Pacheco, et al., 1988). Los resultados obtenidos a partir de la clasificación digital de imágenes Landsat TM en varias áreas del Macizo Hespérico (Rowan, et al., 1987), han permitido utilizar esta técnica en el área de Alburquerque-La Codosera. La reflectancia de los suelos derivados de rocas afectadas por metamorfismo de contacto es menor en el visible e infrarrojo próximo que la de los suelos derivados de rocas equivalentes sólo afectadas por metamorfismo regional de bajo grado. La principal diferencia mineralógica: un mayor contenido en caolinita en los suelos situados en las aureolas, no parece ser la causa de estas diferencias espectrales, que se suponen debidas al mayor grado de maduración de la materia orgánica presente en las rocas afectadas por el metamorfismo térmico. Un reciente estudio realizado en las pizarras de la formación Pierre Shale, en Wolcott, Colorado, muestra que las variaciones espectrales que exhiben estas rocas están relacionadas con los cambios en la estructura de la materia orgánica, originados por el aumento de la temperatura que provoca el emplazamiento de un dique (Rowan, et al., en prensa).

2. MARCO GEOLOGICO Y METALOGENETICO

El área de Alburquerque-La Codosera se sitúa en el sector más meridional del Macizo Hespérico, en el límite con la zona de Ossa-Morena. Está conformada por una serie de unidades tectonoestratigráficas bien definidas que se corresponden con dominios fisiográficos fácilmente identificables en las imágenes Landsat TM.

Los materiales más antiguos están constituidos por el denominado Complejo Esquisto Grauváquico (CEG), de edad proterozoico superior. Se trata de una potente serie de materiales pelíticos alternantes con tramos más arenosos y niveles de grauvacas, que afloran al norte y al sur del batolito de Alburquerque (figura 1).

Sobre estos materiales se disponen, de forma discordante, una serie de cuarcitas y pizarras alternantes del Paleozoico inferior, que conforma ambos flancos del sinclinal de La Codosera, al sur, y del sinclinal de Aliseda, al norte. La base de esta formación está bien caracterizada por la "cuarcita armoricana", de edad Arenig. La sucesión de pizarras negras, areniscas y cuarcitas que se disponen por encima de la cuarcita armoricana, contiene fauna de edad Ordovícica y Silúrica.

El Devónico está representado por tramos de areniscas y un nivel de cuarcita, de posible edad Sieginiense, cerca de la base, con un notable enriquecimiento en Fe. Sobre ellos se disponen pizarras grises con tramos carbonatados, lutitas, cherts y rocas volcánicas, aflorantes en el núcleo del sinclinal de La Codosera. El carbonífero inferior está representado únicamente en el sector norte, en el sinclinal de Aliseda.

Un primer episodio de deformación, de posible edad sárdica, afectó a los materiales preordovícicos, produciendo pliegues de orientación variable y venas de cuarzo que posteriormente fueron modificados

por la deformación hercínica. Esta última fase de deformación origina pliegues de dirección general NO-SE, con esquistosidad de plano axial asociada, una intensa deformación dúctil (Sanderson et al., en prensa) y un metamorfismo regional de facies de los esquistos verdes.

Posteriormente a la etapa de deformación hercínica, se produjo un episodio intrusivo de materiales graníticos. El batolito de Albuquerque intruye en los materiales del CEG y atraviesa las estructuras hercínicas del extremo occidental del sinclinal de La Codosera, presentando características de un granito tardicinemático sólo afectado por la fracturación tardihercínica. Se trata de un cuerpo granítico de considerables dimensiones, unos 50 km de extensión longitudinal, y una anchura media de 7 km. En el sector de San Vicente de Alcántara sufre un estrechamiento, quedando reducido su afloramiento a 2,5 km (figura 1). La falla de Plasencia produce un desplazamiento sinistral sobre el mismo, claramente patente en las imágenes TM.

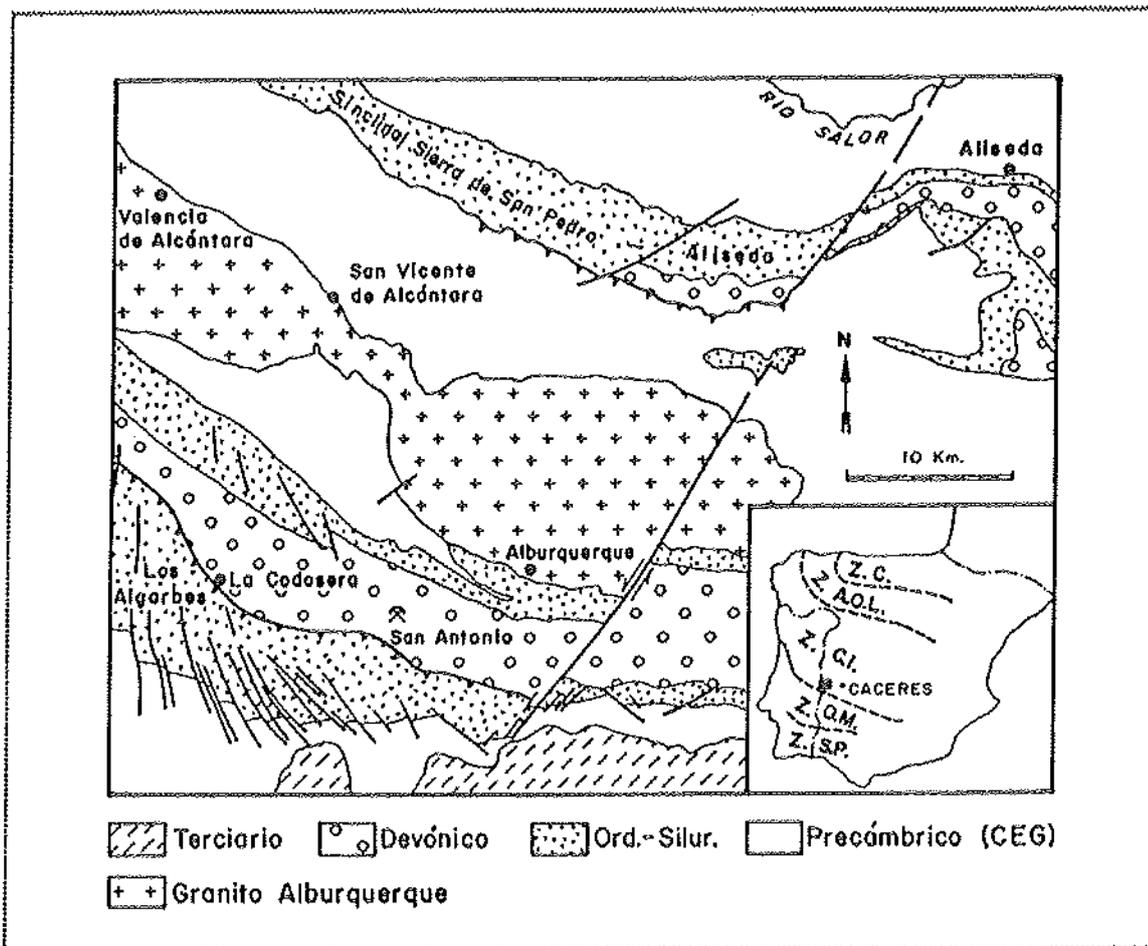


Figura 1.— Esquema geológico del área de Albuquerque-La Codosera.

Este cuerpo intrusivo produce metamorfismo de contacto en los materiales metasedimentarios encajantes, en los que origina una aureola de anchura variable. La paragénesis mineral de las rocas afectadas por el metamorfismo térmico es de cordierita-andalucita-moscovita-cuarzo en las áreas próximas al granito (facies de corneanas) y de moscovita-biotita-cuarzo en las áreas más distales de la aureola (facies de pizarras mosqueadas).

En este área, se presentan una serie de mineralizaciones asociadas al granito de Albuquerque: mineralizaciones de U-P, principalmente en filones intragraníticos de dirección N-S y NE-SO, y mineralizaciones de Sn-W-Li en filones intra y extrabatolíticos y en pegmatitas.

La presencia de mineralizaciones de Sb-Au en filones en el CEG, y de Au en venas de cuarzo en los materiales paleozoicos parece estar relacionada con las estructuras generadas durante el régimen tectónico transpresivo hercínico (Sanderson, et al., op. cit.), aunque el origen primario de las diseminaciones de Au es incierto.

3. VEGETACION Y USO DEL SUELO

El área de estudio presenta un clima mediterráneo, con inviernos fríos y húmedos y veranos secos y calurosos. El relieve es relativamente moderado. Las elevaciones oscilan entre 400 y 700 m. Las principales elevaciones vienen dadas por las crestas de la cuarcita armoricana. Los materiales del CEG presentan una topografía muy suave, típica del modelado de penillanura. Los materiales graníticos dan relieves intermedios.

El uso del suelo en los materiales del CEG es eminentemente de tipo agrícola, predominando el cultivo extensivo de cereales en las áreas próximas a los núcleos de población.

El granito da lugar al típico paisaje de roquedo con grandes bloques redondeados y la red de drenaje encajada a favor de fracturas NS, NE-SO y NO-SE. En el sector de Valencia del Alcántara, los materiales graníticos producen una topografía más acusada que en el sector oriental, al norte de Albuquerque, donde la morfología es más suave. En este sector, el uso agrícola es de dehesas de encinas y pasto con algunas áreas cultivadas de cereales. Los afloramientos graníticos presentan un recubrimiento de musgo y líquen que puede llegar hasta un 95 por 100 de su superficie.

La cubierta vegetal asociada a los materiales paleozoicos es mucho más importante, con bosques de pino, jara y eucaliptos de repoblación jalonando las áreas más elevadas. Sólo las zonas más deprimidas, asociadas a los materiales pelíticos menos resistentes, presentan campos de cultivos de cereales.

4. ANALISIS DE IMAGENES LANDSAT TM

Se ha procesado un cuarto de escena Landsat TM (203-33, Q2 del 5 de Agosto de 1985) con el fin de analizar las diferencias espectrales que muestran las principales unidades litológicas presentes en el área de Albuquerque-La Codosera.

Las imágenes registradas durante el verano son óptimas para el estudio de la reflectancia de suelos expuestos en los campos arados de áreas cultivadas (Antón-Pacheco, et al., op. cit). Se han utilizado técnicas convencionales de procesamiento de imágenes para generar distintos tipos de combinaciones en falso color:

— Generación de varias combinaciones en color de bandas individuales TM. En la imagen TM 745 (ARV), los principales rasgos geológicos aparecen bien definidos. El granito de Albuquerque exhibe una expresión morfológica y una cubierta vegetal características. En el sector noroccidental, en azul oscuro, el granito muestra buenos afloramientos y una marcada red de fracturación, mientras que en el sector oriental, que aparece en color azul más claro en la imagen, presenta una textura más suave debido a una contribución más importante de suelo debido a una mayor erosión del cuerpo intrusivo en este sector. El color azul que presenta el granito en la imagen TM 745 está relacionado con la respuesta espectral del musgo y líquen que recubren la mayor parte de los afloramientos y que son capaces de enmascarar los rasgos espectrales característicos del granito (Ager y Milton, 1987).

Los campos de cereales en los materiales precámbricos del CEG situados al norte del granito de Albuquerque, entre San Vicente y Valencia de Alcántara, aparecen dando una estructura característica, con colores diferentes según el tipo de vegetación asociada a los mismos. Los campos con rastrojo aparecen en colores amarillos y los campos en barbecho o con pasto seco aparecen en colores azulados. Los suelos abiertos expuestos en campos arados presentan colores diferentes según su situación respecto al granito: los suelos próximos al granito presentan un color morado, tanto más intenso cuanto mayor es su proximidad al contacto del cuerpo intrusivo. Este color va gradando a tonos más claros a medida que los campos aparecen más alejados del granito. En las áreas más distales, los suelos presentan un color blanco. Estas diferencias de colores están relacionadas con la diferente respuesta espectral de los suelos derivados de rocas afectadas por metamorfismo de contacto (Rowan, et al., op. cit).

— Las imágenes compuestas a partir de cocientes entre bandas proporcionan una mayor información sobre la composición de suelos y rocas al incrementarse el contraste espectral, disminuyéndose al mismo tiempo los efectos de la iluminación debidos a la topografía. El cociente TM 4/3 (figura 2) se utiliza para acentuar las áreas con vegetación, que aparecen dando colores muy claros correspondientes a valores digitales altos, debido al fuerte incremento de la reflectancia de la vegetación en TM 4 respecto de TM 3. Este cociente permite discriminar los suelos abiertos que, al no tener vegetación asociada, aparecen dando colores muy oscuros.

— Otro tipo de transformación que se ha utilizado en el análisis de la información TM es la de componentes principales. En este tipo de proceso, la información de las seis bandas TM del visible e

infrarrojo próximo, que están muy correlacionadas entre sí, se transforma en 4 ó 5 componentes principales. Las tres primeras componentes contienen más del 90 por 100 de la variabilidad de los datos originales. En términos relativos a características superficiales, la primera componente contiene la variabilidad de la reflectancia general de la escena, relacionada en gran parte con la topografía. El resto de las componentes principales contienen información sobre variaciones espectrales más sutiles de los materiales superficiales. En la figura 3 aparece la componente principal 3 en la que los suelos abiertos aparecen muy bien definidos dando colores claros. La combinación en color PC 423 (ARV) es muy adecuada para discriminar dichos suelos. El contacto del granito con los materiales metasedimentarios encajantes aparece de forma neta en esta imagen.



Figura 2.— Cociente TM 4/3. AI: Albuquerque. LC: La Codosera. SV: San Vicente de Alcántara.

Con el fin de analizar la diferente respuesta espectral que exhiben los suelos expuestos en campos arados, se ha seleccionado una subescena correspondiente a un área de 17 x 13 km² situada en los materiales precámbricos del CEG al norte del granito, entre San Vicente y Valencia de Alcántara. Los campos de cereales presentan en este área unas dimensiones suficientes para ser bien identificados en la imagen TM 745 (ARV) (figura 4). En este sector la litología es razonablemente uniforme y la topografía moderada, por lo que las variaciones de la respuesta espectral de los suelos deben ser función de la naturaleza de los mismos.

5. ESTUDIOS MINERALOGICOS

El granito origina suelos arenosos, de grano grueso y color claro, siendo el cuarzo el mineral dominante y, en menor proporción, la plagioclasa y el feldespato potásico. La caolinita aparece como un producto secundario de alteración de los feldespatos.

Los suelos derivados de las pizarras y grauvacas del CEG presentan una textura de grano más fino, con mayor proporción de fracción arcillosa, aunque todavía con un contenido importante de cuarzo, especialmente en los suelos derivados de las grauvacas.

Se ha realizado un muestreo de suelos y rocas de los materiales del CEG a lo largo de dos cortes de dirección NE-SO, desde el contacto con el granito, al sur, hasta el contacto con la cuarcita armoricana de la base del Ordovícico, al norte. Las muestras de suelo y de roca del sustrato han sido tomadas en campos arados, sin vegetación, identificados en la imagen Landsat TM 745 (figura 4).

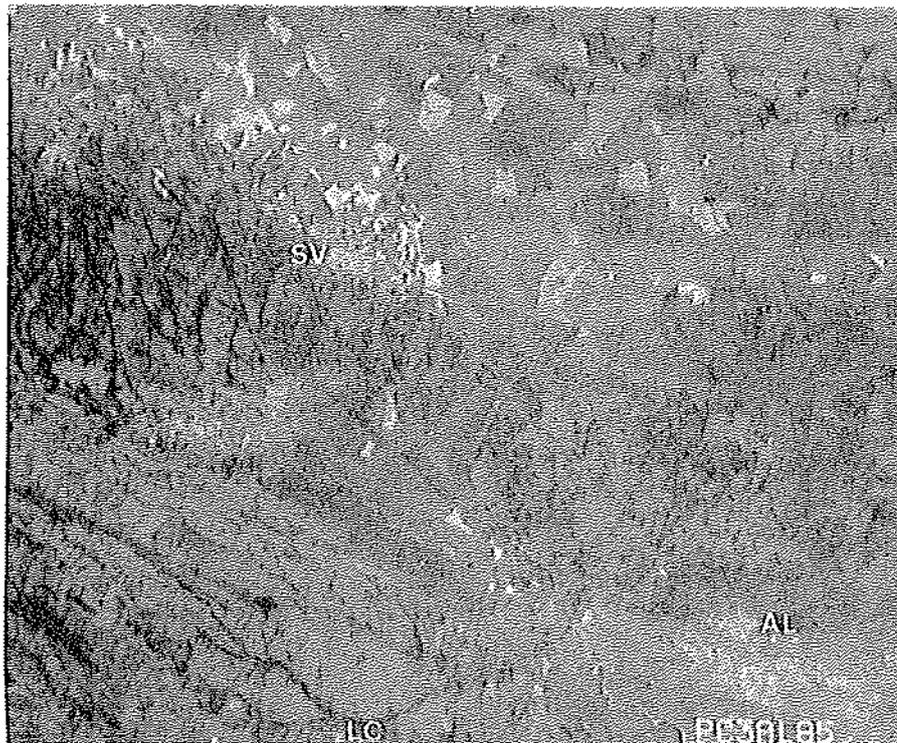


Figura 3.— Componente principal 3. AL: Alburquerque. LC: La Codosera. SV: San Vicente de Alcántara.

El estudio mineralógico de los suelos se ha realizado por difracción de rayos X (DRX), analizándose tanto la fracción $<2 \mu\text{m}$ como la $>2 \mu\text{m}$. El análisis semicuantitativo de la fracción principal y de la fracción arcillosa ha sido realizado en el laboratorio de DRX del ITGE.

Los minerales presentes en la fracción arcillosa son illita, moscovita, vermiculita, clorita y caolinita. La illita y moscovita representan aproximadamente el 20 por 100 de los suelos derivados de corneanas y pizarras mosqueadas, constituyendo un 16 por 100 de los suelos formados a partir de pizarras y grauvacas del exocontacto. La clorita y vermiculita constituyen aproximadamente un 8 por 100 de los suelos derivados de pizarras mosqueadas y de pizarras del exocontacto, apareciendo muy raramente en suelos derivados de corneanas. Los porcentajes relativos de ambos grupos de minerales parecen presentarse en orden inverso: cuando la proporción de illita-moscovita aumenta, decrece la proporción de clorita-vermiculita. La caolinita aparece exclusivamente en suelos derivados de corneanas y pizarras mosqueadas.

El análisis mineralógico utilizado conjuntamente con los estudios de reflectancia espectral de laboratorio, proporcionan una base preliminar para la caracterización espectral de los suelos.

El estudio petrográfico de las rocas del sustrato de las que se derivan estos suelos, ha sido realizado con el fin de determinar el grado de metamorfismo térmico de estas rocas, en base a la aparición de diversos minerales de neoformación. Se han diferenciado dos zonas de metamorfismo de contacto en base a las asociaciones minerales presentes en las rocas estudiadas. La secuencia en orden creciente de intensidad de metamorfismo es: pizarras sólo afectadas por el metamorfismo regional \rightarrow zona de pizarras mosqueadas \rightarrow zona de corneanas. La zona de las pizarras mosqueadas se caracteriza por la presencia de pequeños porfiroblastos de biotita, frecuentemente cloritizada, en la matriz. En algunas muestras, los cristales de biotita son tan pequeños que no son identificables en las muestras de mano. En la zona de las corneanas, los porfiroblastos están constituidos por andalucita y/o cordierita en las zonas más próximas al contacto con el granito.

6. ESTUDIOS DE REFLECTANCIA ESPECTRAL

Se han realizado medidas de reflectancia espectral de laboratorio de las muestras de suelo, utilizando un espectrofotómetro Perkin-Elmer Lambda 9, con esfera integradora y standard de sulfato de bario, en el Instituto de Cerámica y Vidrio del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Las lecturas han sido realizadas a intervalos de 0,5 nm en la región de 0,4 a 0,9 μm y 2 nm en la región de 0,9 a 2,3 μm .

Las curvas espectrales de laboratorio de estos suelos aparecen en la figura 5b. En la figura 5a aparecen los espectros de los minerales puros: illita, moscovita, clorita, vermiculita y caolinita, que componen la fracción arcillosa de los mismos.

Los espectros de los distintos tipos de suelos desarrollados sobre corneanas (C), pizarras mosqueadas (PM) y pizarras del exocontacto (P) han sido interpretados teniendo en cuenta los rasgos de absorción y los valores de reflectancia que presentan a 1,6 μm .

La curva media de reflectancia correspondiente a las pizarras no afectadas por el metamorfismo de contacto (P) exhibe un pico de absorción moderadamente intenso en la región de 2,20 μm , que puede atribuirse a la absorción producida por los grupos AlOH presentes en la illita y la moscovita (Hunt, et al., 1976). El pico de absorción asimétrico que aparece a 1,9 μm , puede relacionarse con la absorción producida por el agua molecular presente en la clorita y vermiculita, mientras que el rasgo que aparece a 1,4 μm se atribuye a la presencia de grupos OH^- en estos minerales. La reflectancia media de este grupo de suelos varía entre 50 a 60 por 100 a 1,6 μm , produciéndose una acusada disminución de la reflectancia en la región visible del espectro.

Los espectros de los suelos correspondientes a pizarras mosqueadas (PM) muestran los mismos rasgos de absorción que los de los suelos de pizarras (P), aunque son menos intensos, especialmente el pico de absorción a 2,20 μm . La reflectancia es también más baja: aproximadamente 40 por 100 a 1,6 μm , con una acusada bajada de reflectancia en el visible.

Los espectros de los suelos desarrollados sobre corneanas (C) exhiben los mismos rasgos de absorción pero muy atenuados. La reflectancia media es mucho más baja: aproximadamente de un 20 por 100 a 1,6 μm y la caída en el visible es mucho más suave.

Estas diferencias espectrales no parecen estar relacionadas con las diferencias mineralógicas de los suelos. Las diferencias más importantes en cuanto a la composición mineralógica, es que los suelos de contacto tienen caolinita en su composición y que la presencia de clorita-vermiculita es rara. Sin embargo la típica banda de absorción que produce la caolinita a 2,20 μm es muy débil en el espectro de este tipo de suelos. La mayor intensidad de la banda de absorción a 2,20 μm que presentan los suelos de exocontacto respecto de la que presentan los suelos de contacto, no se ajusta a la mayor proporción de caolinita en estos últimos, que deberían mostrar un pico de absorción mucho más intenso.

Las mencionadas diferencias espectrales deben explicarse por otras causas, como son las producidas por la absorción diferencial originada por la materia orgánica presente en las pizarras, que puede llegar a constituir un 2 por 100. La opacidad de la materia carbonosa aumenta con el incremento de la temperatura asociado a fenómenos de metamorfismo de contacto (Bostwick, et al., 1984), de manera que pequeñas cantidades de materia orgánica finamente diseminada provoca una marcada

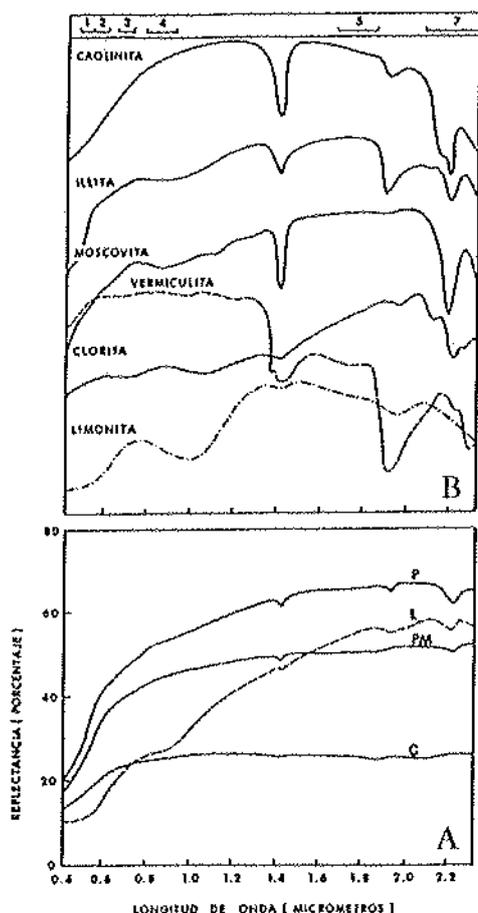


Figura 5.— A: Curvas espectrales de laboratorio de Suelos derivados de: corneanas (C), pizarras mosqueadas (PM), pizarras (P) y rocas sedimentarias con alto contenido en Fe (L) - B: Curvas espectrales de laboratorio de los minerales puros presentes en los suelos analizados.

La opacidad de la materia carbonosa aumenta con el incremento de la temperatura asociado a fenómenos de metamorfismo de contacto (Bostwick, et al., 1984), de manera que pequeñas cantidades de materia orgánica finamente diseminada provoca una marcada

atenuación de los rasgos espectrales (Johnson, et al., 1973; Rowan, et al., en prensa). Este material mezclado con otros minerales reduce la reflectancia general de la muestra y suprime los rasgos de absorción característicos de los minerales presentes en la roca o suelo, en una relación no lineal con el contenido en materia orgánica (Clark, 1983).

7. CLASIFICACION DIGITAL

Con objeto de obtener una información más objetiva respecto de las diferencias espectrales que exhiben los distintos tipos de suelos en la información Landsat TM, se ha realizado una clasificación no supervisada de la subescena de San Vicente de Alcántara (figura 4), aplicando un clasificador de tipo bayesiano o de máxima probabilidad sobre el conjunto de las bandas TM del visible e infrarrojo próximo. La información derivada de los estudios mineralógicos y petrográficos de las muestras de suelo y roca tomadas en el campo es fundamental para realizar una interpretación adecuada de las clases resultantes. Sobre esta base, se ha establecido la asignación de las clases correspondientes a suelos abiertos, obteniéndose tres clases diferentes cuya estadística aparece en la Tabla 1.

TABLA 1
Valores estadísticos de las clases correspondientes a suelos abiertos que aparecen en la figura 7

Clase		TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	PTS
Suelo derivado de Corneanas	Media DN	110.99	58.46	75.46	70.20	120.01	70.25	2.700
	Desv. Std.	5.42	3.90	5.08	3.78	7.55	5.08	
Suelo derivado de Pizarras Mosqueadas	Media DN	123.56	67.53	86.96	78.86	137.23	82.48	2.178
	Desv. Std.	6.53	4.09	4.78	3.54	7.16	4.76	
Suelo derivado de Pizarras Exocontacto	Media DN	123.18	68.20	90.62	85.68	168.50	100.07	11.259
	Desv. Std.	6.32	4.31	5.32	4.99	12.29	7.60	

La media de los valores digitales (DN) en las distintas bandas TM para estas tres clases de suelos (figura 6) muestra una buena correspondencia con las curvas espectrales de laboratorio (figura 5B). Las clases correspondientes a estos suelos presentan valores digitales que se solapan en TM 1 y TM2, mostrando una buena separación en el resto de las bandas TM, especialmente en TM5.

La figura 7 corresponde a la imagen clasificada en la que se han representado en color las clases asignadas a suelos. El color rojo (C) se adscribe a suelos desarrollados sobre corneanas, rocas que han sufrido un grado intenso de metamorfismo térmico. Estos suelos se localizan en los materiales precámbricos, a lo largo de una estrecha banda en la zona más próxima al contacto con el granito. El color naranja (PM) corresponde a suelos derivados de grauvacas y pizarras mosqueadas que se sitúan en la zona más externa de la aureola de metamorfismos de contacto. Por último, el color amarillo (P) corresponde a suelos desarrollados sobre pizarras y grauvacas sólo afectadas por el metamorfismo regional de bajo grado, que se disponen en zonas más distales del granito fuera de la aureola.

Una clasificación similar se ha realizado sobre toda la imagen correspondiente al área de estudio de Alburquerque-La Codosera. Sobre la imagen clasificada resultante se ha definido una máscara con objeto de sólo utilizar las clases correspondientes a suelos derivados de corneanas y pizarras mosqueadas. Ambas clases se han codificado en rojo —clase de contacto— que se ha sobrepuesto sobre la imagen TM5 (B/N) (figura 8). El color verde corresponde a suelos limoníticos, muy ricos en hierro, que se desarrollan sobre cuarcitas, pizarras y calizas del Devónico. La curva de reflectancia de laboratorio de estos suelos (L en figura 5A), muestra la ancha banda de absorción característica a 0.87 μm que se

atribuye al Fe_2O_3 presente en la limonita (Hunt, et al., 1971). La media de los valores digitales TM de esta clase (L en figura 6) presenta valores relativamente bajos en TM2, TM3 y TM4, debido a las absorciones que producen los óxidos de hierro en estas longitudes de onda.

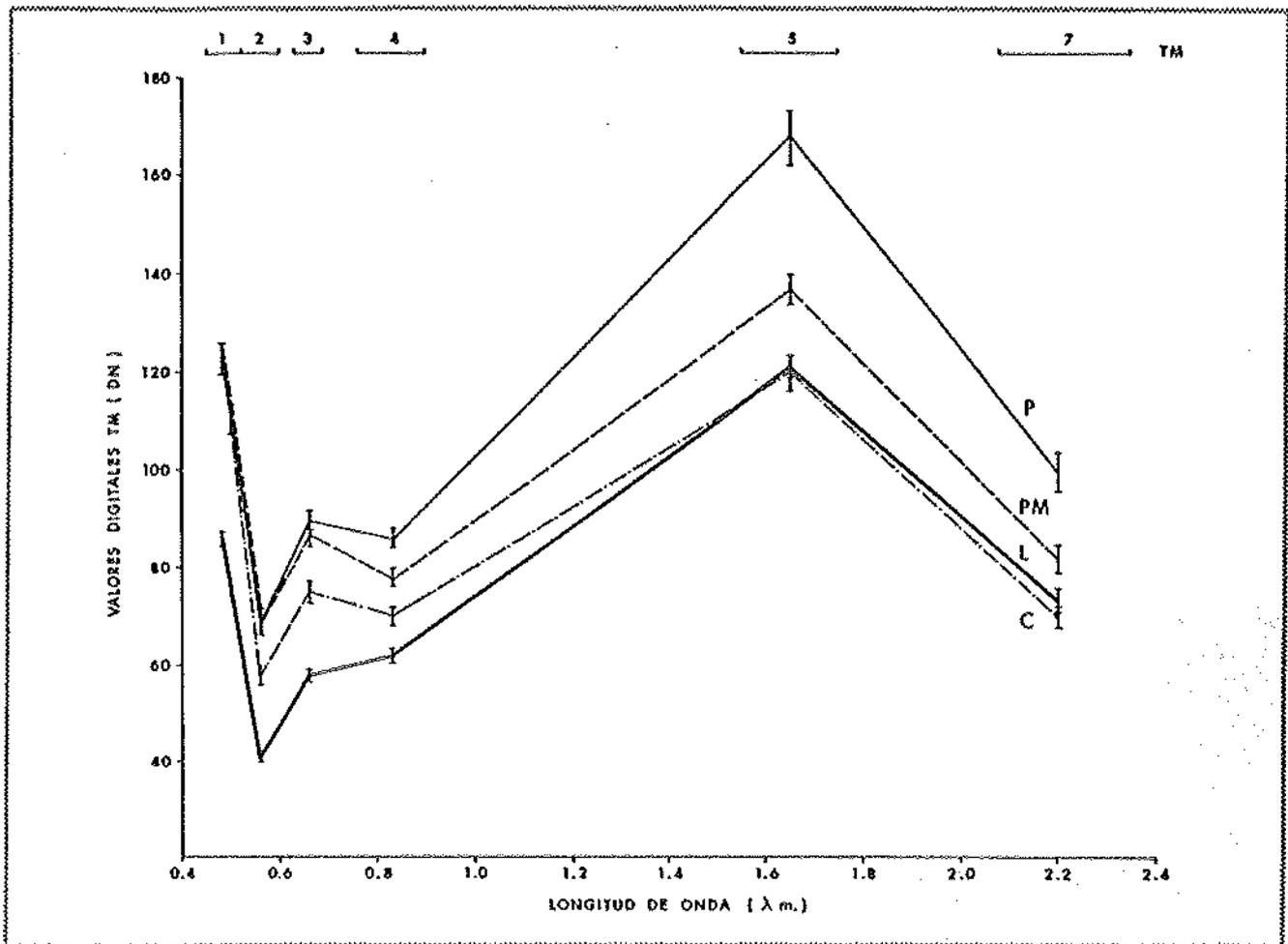


Figura 6.— Media de los valores digitales (DN) \pm una desviación standard en seis canales TM para las clases -suelo derivado de pizarras; - - -suelo derivado de pizarras mosqueadas • - suelo derivado de corneanas.

8. INTERPRETACION

Las áreas correspondientes al suelo clasificado como de contacto, derivado de corneanas y pizarras mosqueadas, que aparecen al norte del granito de Albuquerque (figura 8), coinciden bien con la cartografía de la aureola de metamorfismo térmico originada por el granito en los materiales precámbricos. El ensanchamiento de la aureola en el extremo noroccidental, no expresado en la cartografía geológica existente, ha sido verificado en el campo y por estudios petrográficos. La mayor extensión de la aureola en este sector podría indicar un buzamiento más suave del granito en profundidad. La zona de la aureola más próxima al contacto con el granito sólo aparece parcialmente representada en la clasificación, debido a que el uso del suelo en las corneanas más masivas es de campos de frutales y de olivos, siendo el cultivo de cereal muy ocasional, por lo que muy pocas áreas presentan suelos abiertos.

La aureola al sur del granito aparece mal representada, pues este sector exhibe una cubierta vegetal mayor, con menos campos de cereales que presenten suelos arados susceptibles de ser clasificados. Sin embargo, un área muy alejada del granito de Albuquerque, ubicada en pizarras negras del Devónico inferior, al oeste de La Codosera, clasifica como suelo de contacto. El estudio petrográfico de las rocas subyacentes muestra la presencia de porfiroblastos de cordierita muy pseudomorfizada y sericitizada, cortando la esquistosidad de crenulación. Este hecho permite suponer que estas rocas han sido afectadas por metamorfismo de contacto a pesar de que un fenómeno de alteración hidrotermal posterior dificulta su estudio. Sin embargo, la coincidencia en este área de una anomalía aeroradiométrica de potasio (Pérez Cerdán, et al., en este mismo volumen) y el inicio de un mínimo gravimétrico (Campos y Gumiel, 1990) permite plantear la posible existencia de un cuerpo granítico subaflorente.

Figura 4.— Ventana Landsat TM 745 (ARV) del área de San Vicente-Valencia de Alcántara con situación de muestras de suelo y roca.

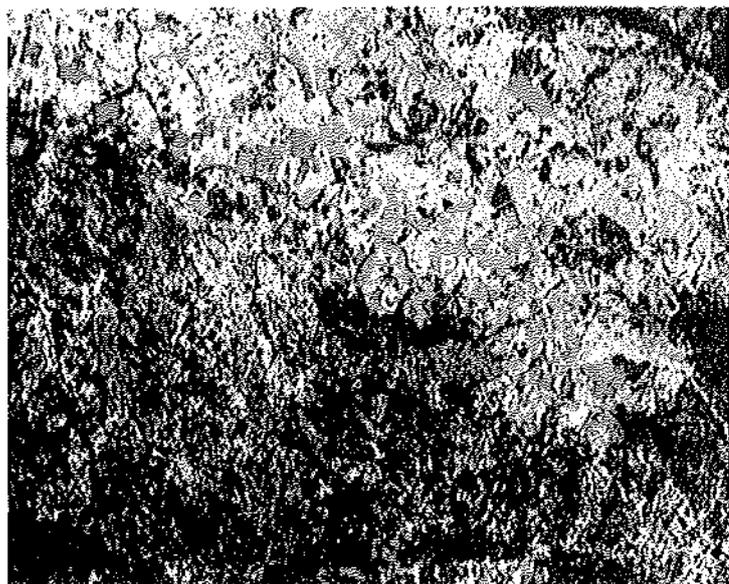
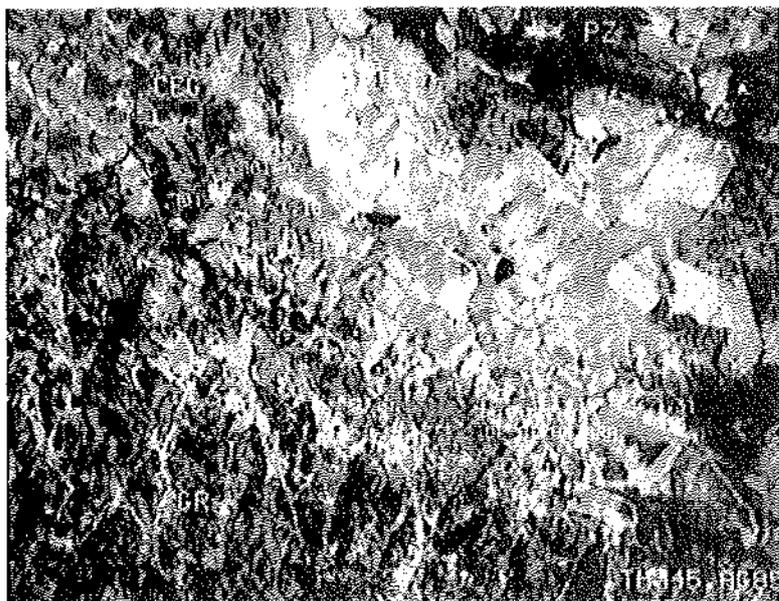
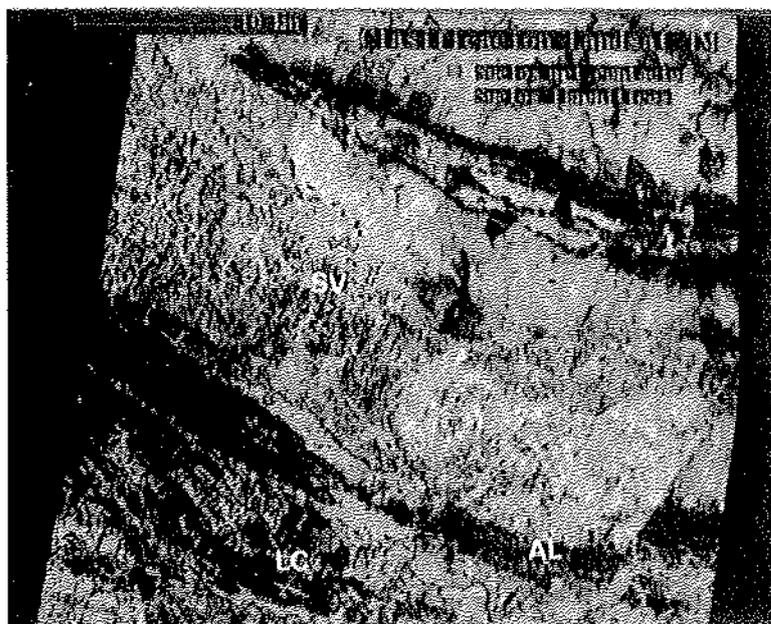


Figura 7.— Clasificación Bayesiana del área de San Vicente-Valencia de Alcántara. P: suelos derivados de pizarras del exocontacto. PM: suelos derivados de pizarras mosqueadas. C: suelos derivados de corneanas.

Figura 8.— Subescena Landsat TM5 georreferenciada con superposición de la clasificación digital. AL: Alburquerque. LC: La Codosera. SV: San Vicente de Alcántara.



Las áreas clasificadas como suelos limoníticos se localizan preferentemente en dos zonas. Una de ellas, situada en el extremo más suroccidental del área de estudio, en el sector de la Portilla de los Bastos, corresponde a suelos muy ricos en Fe desarrollados sobre cuarcitas ferruginosas, a las que se asocian importantes anomalías geoquímicas de Au (E.E.C., en prensa). La segunda zona de suelos limoníticos aparece en el área de La Calera, asociados a carbonatos del Devónico medio, en los que por el momento no se han reconocido anomalías geoquímicas de interés minero.

9. CONCLUSIONES

La clasificación digital de datos multispectrales Landsat TM ha probado ser eficaz en la cartografía de la aureola de metamorfismo de contacto que produce el granito de Alburquerque en los materiales metasedimentarios en los que intruye. Esta técnica, utilizada anteriormente, con buenos resultados, en otras áreas del Macizo Hespérico en contextos metamórficos regionales de bajo grado, ha permitido diferenciar dos clases espectrales bien diferenciadas, asociadas a suelos derivados de rocas afectadas por distinto grado de metamorfismo térmico.

La extensión de la clasificación digital en el área de La Codosera, donde no se conocen materiales graníticos aflorantes y en la que existen importantes anomalías geoquímicas de Au, ha permitido localizar un área que presenta la misma respuesta TM que los suelos situados en la aureola de metamorfismo del batolito de Alburquerque. El estudio petrográfico de las rocas del sustrato demuestra que han sido afectadas por metamorfismo térmico. La coincidencia en este área de una anomalía aerorradiométrica positiva de K y el inicio de una anomalía gravimétrica negativa permiten plantear la posible existencia de un cuerpo intrusivo en profundidad.

10. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido subvencionado parcialmente por la Comisión de las Comunidades Europeas. El Instituto de Cerámica y Vidrio del CSIC puso amablemente a nuestra disposición el espectrofotómetro Perkin Elmer. Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento a D. Sanderson, de la Univ. de Southampton y a P. Gumiel y R. Campos, del ITGE, la ayuda prestada en el intercambio de ideas y trabajo de campo. A. Bel-Lan y J.C. Gumiel prestaron una inestimable ayuda en el tratamiento digital.

BIBLIOGRAFIA

- Ager, C.M. y Milton, N.M. 1987. Spectral reflectance of lichens and their effects on the reflectance of rock substrates. **Geophysics**, 52, 7: 898-906.
- Antón-Pacheco, C. et al. 1988. The use of supervised Bayesian classification on Landsat digital Thematic Mapper data to map contact metamorphic rocks around the Trujillo and Plasenzuela plutons, Extremadura, Spain. En **II European Workshop on Remote Sensing in Mineral Exploration**. CEE.EUR 11317: 469-492.
- Bostick, N.H. y Pawlewicz, M.J. 1984. Paleotemperatures based on vitrinite reflectance on shales and limestones in igneous dike aureoles in the Upper Cretaceous Pierre Shale, Walsenburg, Colorado. In **Rocky Mountain Assn. Geol.**, J. Woodward, F. Meissner and J.L. Clayton (Eds.): 387-392.
- Campos, R. y Gumiel, P. 1990. Estudio gravimétrico en Extremadura (Zona de La Codosera-Alburquerque y Albalá y su aplicación a la exploración de yacimientos minerales). **Bol. Geol. Minero**. 101-1: 122-134.
- Clark, R.N. 1983. Spectral properties of mixtures of montmorillonite and dark carbon grains: implications for remote sensing minerals containing chemically and physically absorbed water. **Jour. Geophys. Res.** 88: 10.635-10.644.
- E.E.C. 1990. Development of new multidisciplinary techniques for mineral exploration in several areas of the western Iberian Peninsula. Vol I, MA1M-0032-C(A), P. Gumiel ed., 160 p.

- Hunt, G.R. Salisbury, J.W. y Lenhoff, Ch.J. 1971. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: III Oxides and Hydroxides. **Modern Geology** 2: 195-205.
- Hunt, G.R. y Salisbury, J.W. 1976. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: XII Metamorphic rocks. **Modern Geology**. 5: 219-228.
- Johnson, T.V. y Fanale, F.P. 1973. Optical properties of carboneaceous chondrites and their relationship to asteroids: **Jour. Geophys. Res.** 78: 8.507-8.518.
- Pérez Cerdán, F. et al. En este volumen. Aplicación de un sistema de Información Geográfica en investigación geológica. **III Reunión Científica del Grupo de Trabajo en Teledetección**. Madrid, 1990.
- Rowan, L.C. et al. 1974. Discrimination of rock types and detection of hydrothermally altered areas in south central Nevada by the use of computer-enhanced ERTS images. **U.S. Geol. Surv. Prof. Paper** 883: 35 p.
- Rowan, L.C. et al. 1987. Digital classification of contact metamorphic rocks in Extremadura, Spain, using Landsat Thematic Mapper data. **Geophysics**. 52, 7: 885-897.
- Rowan, L.C. et al. En prensa. Evaluation of visible, near infrared and thermal-infrared reflectance spectra for studying thermal maturity of Pierre Shale, Wolcott, Colorado.
- Sanderson, D., et al. En prensa. Hercynian Transpressional tectonic at the Southern margin of the Central Iberian Zone, West Spain. **Bol. Soc. Geol. London**.