



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España



**boletín**

**geológico**

**y minero**

VOLUMEN 104

Julio - Agosto 1993

NUMERO 4



25 ABR 1993



Volumen 104  
Número 4  
Julio - Agosto 1993

# boletín geológico y minero

revista bimestral de geología, minería y ciencias conexas fundada en 1874 - 5.ª serie

## Sumario

<b>Geología</b>	E. SANZ PEREZ: Icnitas de Dinosaurios en Matasejún (Soria) ... .. 3
	A. RIAZA GARCIA: Reflectancia en rocas en función de su litología y fábrica interna. IV. Reflectancia en relación con los elementos de la fábrica interna de las rocas y distintos tipos de metamorfismo en el CEG. Su expresión en imágenes thematic mapper y análisis espacial de datos estructurales y microestructurales ... .. 14
<b>Minería</b>	M. SUAREZ, J. NAVARRETE y J. M. MARTIN-POZAS: Estudio mineralógico del yacimiento de paligorskita de Bercimuel (Segovia) y de su entorno. 51
<b>Aguas subterráneas</b>	P. NIETO LOPEZ-GUERRERO: Posible contribución de la infraestructura hidrogeológica al Programa Nacional de ARU ... .. 60
<b>Ingeniería geoambiental</b>	J. C. ARRANZ, J. ALMOROX ALONSO y R. ANTONIO GARCIA: Análisis crítico de modelos de predicción de la erosión hídrica en minería y obra civil ... .. 66
<b>Rocas industriales y ornamentales</b>	F. J. ALONSO, J. S. CHINCHON, J. ORDAZ, E. HERNANDEZ, A. ALASTUEY y R. M. ESBERT: Las piedras de construcción de la Seu Vella de Lérida: Tipos, petrografía y propiedades físicas ... .. 75
<b>Estudio de minerales y rocas</b>	A. APARICIO, J. M. BRELL y R. GARCIA: El metamorfismo hercínico de bajo y muy bajo grado en la Zona Cantábrica (provincias de León, Asturias, Cantabria) ... .. 83
<b>Información</b>	Libros ... .. 106

DIRECCION Y ADMINISTRACION  
Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid  
Teléf./Fax (91) 349 57 62

**INSTITUTO TECNOLÓGICO  
GEOMINERO DE ESPAÑA**

**MINISTERIO DE INDUSTRIA Y ENERGIA**  
Secretaría General de la Energía y Recursos Minerales

El Instituto Tecnológico Geominero de España hace presente que las opiniones y hechos consignados en sus publicaciones son de la exclusiva responsabilidad de los autores de los trabajos

Los derechos de propiedad de los trabajos publicados en esta obra fueron cedidos por los autores al Instituto Tecnológico Geominero de España.  
Queda hecho el depósito que marca la Ley.

#### EXPLICACION DE PORTADA

Capas verticales del techo de la Fm. Utrillas en el desmonte. Al fondo: morfología típica de los tramos del Cretáceo Superior horizontales. Cercanías de Alhama de Aragón

(Foto: Luis M.<sup>a</sup> Ríos.)

Depósito legal: M. 3.279 - 1958  
ISSN 0366 - 0176  
NIPO 241 - 93 - 003 - 0

Imprenta Ideal, S. L. - Chile, 27 - Teléf. 359 57 55 - 28016-MADRID

## Iconitas de Dinosaurios en Matasejún (Soria).

Por E. SANZ PEREZ (\*)

### RESUMEN

Se describe un nuevo yacimiento de iconitas de Dinosaurios en Matasejún (Soria), situado sobre una serie rítmica weáldica de lutitas y cuarzoarenitas del grupo Oncala, sedimentadas en un ambiente playero.

Destacan las iconitas de animales bípedos tridáctilos, atribuibles a un Carnosaurio que podría tratarse de un Therópodo del grupo de los Ceolosauria. Se señala también la presencia de huellas de tipo Igüanodon y otro Therópodo del grupo de las Carnosaurias.

*Palabras clave:* Iconitas, Dinosaurios, Weald, Soria.

### ABSTRACT

In this paper we make a description of some unpublished deposits of Dinosauria tracks in Matasejún (Soria), placed on a Weald ritmic stratigraphical section of lutites and quartzarenites of the Oncala group.

Outstanding tracks of biped three finger animals can be attributed to Carnosauria, which could be classified as a Theropodo of the Ceolosauria Group. We also point out the presence of other from an Igüanodon type and another Theropodo of the Carnosauria Group.

*Key words:* Tracks, Dinosauria, Weald, Soria.

### INTRODUCCION

La primera información que se tuvo de estas iconitas se la debemos a los hermanos Julio y Angel Sáenz Ojuel, descendientes de Matasejún, quienes tuvieron la amabilidad de acompañarnos hasta los lugares del yacimiento paleontológico.

No podemos dejar de agradecer sin embargo, la importante labor realizada por los niños veraneantes de Matasejún, verdaderos descubridores de las pisadas, y quienes con su entusiasmo e imaginación rastrearon y localizaron las iconitas que aquí se estudian, y que nosotros habíamos buscado antes infructuosamente por la zona y otros lugares de la provincia de Soria durante diversos veranos.

(\*) Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Esc. Téc. Sup. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid.

El yacimiento de Matasejún, inédito hasta la fecha, se enmarca dentro de los descubiertos en los últimos años en el Weald de la región de Arnedo y Yanguas. Entre otras localidades, en la Rioja se cita la presencia de iconitas en Igea, Munnilla, Enciso, Zarzosa, Las Ruedas y Cornago. Y en Soria en las de Bretún, Santa Cruz de Yanguas y Villar del Río (fig. 1). Estos yacimientos han sido estudiados, entre otros autores, por CASANOVAS y SANTAFE (1971, 1974), VIERA y TORRES (1979), AGUIRREZABALA y VIERA (1980, 1983), VIERA y AGUIRREZABALA (1982), SANZ (1984), SANT et al. (1985), MORATALLA (1987), y DIAZ et al. (1990).

Dentro del grupo Urbión de la misma facies weáldica, pero más bien hacia el Oeste, se han encontrado otras huellas de dinosaurios en Salas de los Infantes y Regumiel de la Sierra (Burgos), y que han sido estudiadas por SANZ (1983) y el Colectivo Arqueológico Salense (1986 y 1987)

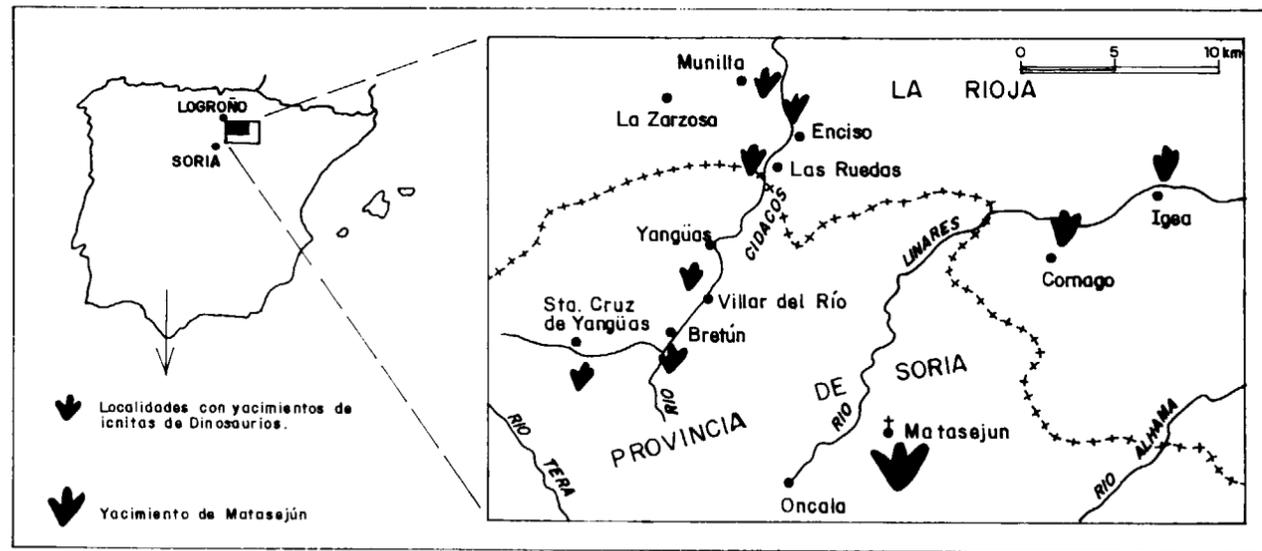


Figura 1.—Situación del yacimiento de icnitas de Dinosaurios de Matasejún.

1. SITUACION DEL YACIMIENTO DE MATASEJUN

El yacimiento paleontológico de Matasejún consta de tres afloramientos: El Castillo, La Sierra y Fuente de la Haya. Sólo el primero es importante, pues en los otros dos únicamente aparece alguna huella suelta y diversas improntas. En los alrededores del pueblo es relativamente corriente encontrarse con otras improntas aisladas, como ocurre en el camino que baja a la Fuente del Chorro.

El afloramiento del Castillo se encuentra en la ladera meridional del cerro del mismo nombre, junto al camino de Valtajeros, muy cerca de la Fuente del Chorro y del antiguo lavadero sito en las orillas del arroyo de Juan Andrés. Dista unos 300 metros de Matasejún y se localiza en las coordenadas 2° 14' 00" y 41° 59' 20". De este lugar se extrajeron piedras y losas para la construcción de las lindes de los prados y de las paredes de las casas del pueblo, hoy ya casi abandonado. Por esta razón, el yacimiento paleontológico se ha destruido parcialmente.

2. GEOLOGIA

2.1. Geología General

La facies wealdica de Cameros, estudiada ini-

cialmente por PALACIOS y SANCHEZ LOZANO (1885), y completada por los trabajos de SAENZ GARCIA (1932, 1942, 1948), BEUTHER et al. (1965), TISCHER (1966) y otros autores posteriores, está adquiriendo gran importancia por los numerosos rastros de huellas de dinosaurios que se están encontrando. Los restos óseos de reptiles y peces, como los encontrados recientemente en Tera (Soria), eran conocidos desde hace tiempo (ROYO y GOMEZ, 1929; SAENZ GARCIA, 1957).

En concreto, el yacimiento de Matasejún se encuentra en una sucesión detrítica arenosa de 300 metros de espesor, que tiene esporádicos niveles calizos de Charáceas y Ostrácodos (IGME, 1981; a, b y c). Las areniscas son sobre todo cuarzoarenitas subarcosas con estratificación lenticular, laminación paralela y oblicua, pararizaduras y señales de bioturbación, como se ve en las cercanías de Matasejún. Corresponde al grupo Oncala y es el mismo nivel que el de los yacimientos de icnitas de Bretún.

2.2. Geología del Yacimiento del Castillo

Las distintas icnitas aparecen agrupadas fundamentalmente en cinco niveles, de 120 cm de espesor total, que representan una alternancia de lutitas y cuarzoarenitas bastante parecidas. Los

planos de estratificación tienen una dirección de 45° y un buzamiento de 20° NE. En la figura 2 se representa la columna estratigráfica y el perfil del yacimiento considerado. De muro a techo hemos distinguido los siguientes niveles:

— Nivel 1:

Es el nivel con mayor abundancia de icnitas. Tiene 10 cm. de espesor. Se trata de una cuarzoarenita, próxima a clasificarse como lutita. En ella predominan los cuarzos y las moscovitas. El contenido en matriz oscila entre el 35 y 50 por 100, estando formada por arcillas de tipo illítico. El cemento es ferruginoso, de tipo pelicular y no supera el 3 por 100 del volumen. La roca tiene un color negrozco, con una superficie de estratificación lisa pero suavemente ondulada.

En ciertos puntos aparecen grandes grietas

de barro (Mud cracks), con bordes de 1 cm de anchura que pueden estar rellenas de materiales de otra naturaleza pertenecientes a los de la capa inmediatamente superior. De forma esporádica aparecen también rizaduras de oscilación de tamaño milimétrico (Wave ripples). Es frecuente la laminación cruzada y subparalela. Hay también huellas monobuladas de reptación con sección más o menos circular, de 0,5 a 1,5 cm de diámetro y cuyo trazado en planta dibuja arcos de amplio radio. Estas estructuras de bioturbación se presentan tanto en forma de calco como en molde.

Este nivel está atravesado por unas diaclasas verticales orientadas unos 40-50° y separadas 1,6-1,7 m; tienen una zona de fractura de 2-3 cm de anchura. Hay grietas subparalelas, discontinuas y cortas, situadas entre estas diaclasas principales.

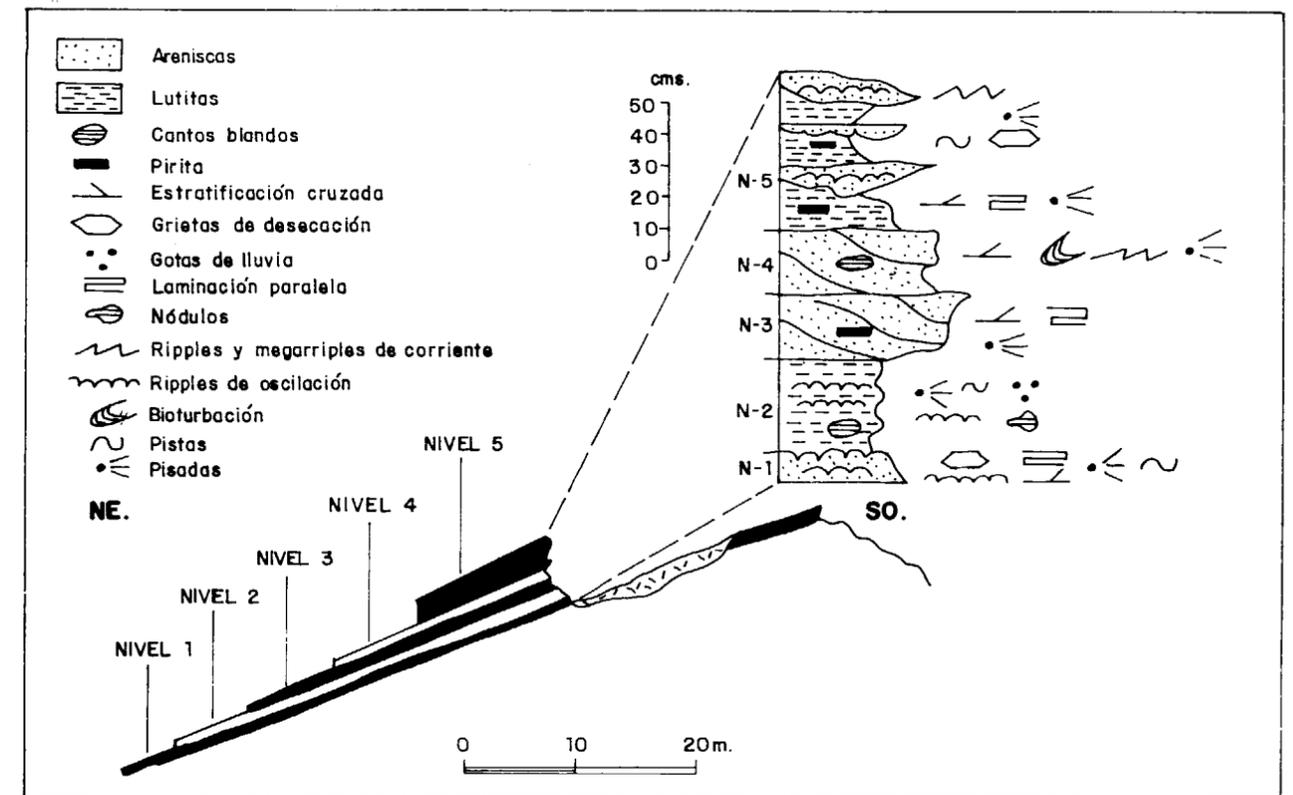


Figura 2.—Corte geológico esquemático (sin escala vertical) del yacimiento de icnitas del Castillo (Matasejún - Soria) y columna estratigráfica de los cinco niveles diferenciados.

## — Nivel 2:

Por encima se sitúan unos 30 cm de lutitas aleuríticas de color gris, de aspecto menos lustroso que la capa anterior, y escasa en icnitas de dinosaurios. Aquí predominan los cuarzos y las moscovitas. Aparecen también algunos feldespatos potásicos y algunas plagioclasas. La matriz constituye el 15 por 100 del total de la roca y es de origen diagenético, debido a la alteración de las micas y de los feldespatos. Lo cementación es ferruginosa pelicular.

Aparecen de forma discontinua pequeñas rizaduras de oscilación (Wave ripples) y huellas monolobuladas de reptación. Hay estructuras de huellas de carga y seudonódulos de cuarzoarenitas de tamaño de 0,5-1 cm. Hay grietas de barro poligonales poco precisas, trenes de ripples de oscilación de tamaño centimétrico, cantos blandos y marcas de gotas de lluvia (Raindrop imprints).

## — Nivel 3:

El nivel 3 es una capa de 15 cm de grosor constituida por cuarzoarenitas muy parecidas al nivel primero. Presenta laminación cruzada y subparalela de tamaño milimétrico. La matriz no supera el 15 por 100 y es de naturaleza arcillosa; el cemento es sintaxial de sílice. Existen minerales autigénicos de moscovita, clorita y piritas. Hay muy pocas icnitas conservadas.

## — Nivel 4:

Superpuesta al nivel anterior hay una capa de unos 15 cm de espesor, clasificada como una subarcosa-cuarzoarenita, bastante lisa y de color ocre. Tiene pocas icnitas de dinosaurios aunque hay zonas donde sin duda han sido intensamente deformadas por el paso de grandes saurios irreconocibles.

Aparecen algunos niveles con un grado de bioturbación importante y rizaduras de oscilación. Existe laminación cruzada. La matriz es arcillosa, inferior al 10 por 100, aunque existe acumulación de lentejones que tienen apariencia de cantos blandos. El cemento, in-

ferior al 2 por 100, es mayoritariamente silíceo, de tipo sintaxial, aunque también hay cemento ferruginoso pelicular. Como minerales autigénicos (4 por 100) se pueden considerar las piritas.

Hay una capa intercalada intensamente diaclasada con fracturas en forma de aspa. Asoma el borde recto de una megarizadura recta u ondulada (Straight-crested megarripples a Undulatory megarripples).

## — Nivel 5:

El nivel 5 tiene unos 50 cm de potencia. En él destaca una capa de lutitas de aspecto lustroso. Se trata de una lutita aleurítica, con laminación paralela y cruzada, muy abundante en moscovitas y en cuarzos. No se aprecia la existencia de cemento. Contiene piritas. La matriz es illítica y procede de la alteración de las micas.

Esta capa presenta algunas icnitas y numerosas pararizaduras de oscilación, de tamaño centimétrico (Asymmetrical wave ripples), con crestas paralelas pero suavemente sinuosas en planta. Hay otra capa de decaparrizaduras linguales a onduladas (Lingoid Small ripples-Undulatory Small ripples), de tamaño centimétrico.

Hay trazas esporádicas de bioturbación, huellas de espuma (Foam impressions) de ambiente playero y que dejan un dibujo geométrico poligonal.

Cubriendo el nivel de pararrizaduras onduladas hay una capa de lutita negruzca bastante lisa de 2 cm de espesor. Está intensamente marcada por improntas de huellas de dinosaurios que se reconocen como suaves depresiones cóncavas, que sin duda han sido borradas y agrandadas por el agua, o han sido originadas por debajo de su nivel. Todas las improntas de icnita tienen una fina película de arcilla brillante y negra, producto de la decantación independiente y particular en estos hoyos, y que suele estar atravesada por grietas poligonales de barro, de 10 a 15 cm de lado, mejor formadas que las que se sitúan fuera, que son además de mayor envergadura.

Aparecen también pararizaduras de oscilación muy bien conservadas.

Este nivel está atravesado por varias diaclasas verticales orientadas 25 a 35°.

## 2.3. Consideraciones Paleoambientales

Todas las observaciones realizadas anteriormente nos informan claramente de una alternancia de inundaciones, estancamientos y sequías siempre en aguas someras. Impera una sedimentación de arenas en ambiente playero deltaico de distinta energía, donde predominan las rizaduras de oscilación sobre las de corriente. Las siguen otros períodos más tranquilos de decantación de arcillas en medio reductor (materia orgánica, piritas), que al quedar emergidas pueden secarse dando lugar a grietas de barro.

Lo más frecuente es que las icnitas se hayan originado sobre el sedimento blando una vez retirada el agua, hallándose sobrepuestas, tanto en rizaduras de oscilación como en rizaduras linguales, excepto en el nivel 5, donde las huellas de posibles iguanodontes parece que se formaron bajo aguas estancadas.

## 3. PALEONTOLOGIA

Como se ha dicho, se han estudiado tres afloramientos, destacando el del Castillejo, donde hay cinco niveles numerados de muro a techo. Cuando en un mismo nivel se hallan varios rastros de icnitas, a cada uno de ellos se le asigna una letra para distinguirlos de los demás.

Las medidas que se dan de las icnitas y sus rastros se relacionan a continuación, adjuntándose un esquema de sus parámetros estudiados (fig. 3).

## Afloramiento del Castillejo

Las icnitas halladas son tridáctidas, distribuidas en cinco rastros y siete icnitas sueltas. Hay también varias improntas.

## — Nivel 1:

Es el nivel más interesante, pues en él aparecen tres rastros, dos icnitas sueltas y ocho improntas. Las medidas de los parámetros considerados se pueden seguir en la tabla I.

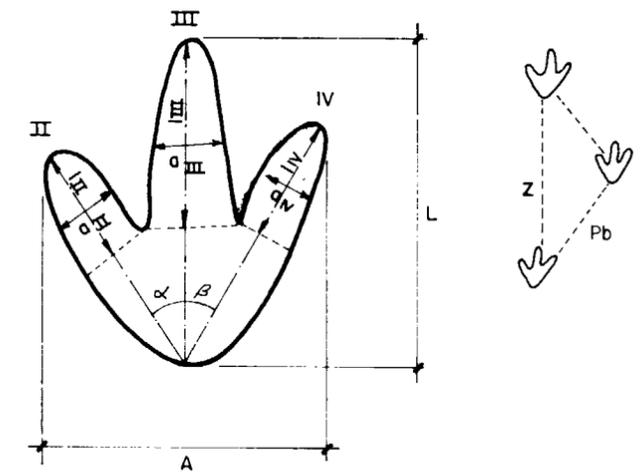


Figura 3.—Parámetros en los rastros de las icnitas más características.

- (L) Largo, obtenido de la distancia que separa el extremo del dedo central III, y el extremo más atrasado del talón.
- (A) Ancho, que viene dado por la distancia máxima entre los dedos laterales de una icnita.
- (a) Anchura de dígito.
- (l) Longitud de dígito.
- (p) Profundidad.
- ( $\alpha$ ) Angulo interdígito.
- ( $\beta$ ) Angulo interdígito.
- (Pb) Paso.
- (Z) Zancada.

**Rastro A:** Se presenta toda en un molde de 6 cm de espesor. La zancada es de unos 0,65 m.

**Rastro B:** Las icnitas 6, 7, 8 y 9 están bastante deformadas y no es seguro que pertenezcan a este rastro. Es corriente observar cómo dentro del mismo hay icnitas más grandes y más pequeñas, con talones más anchos y redondeados, y otros más estrechos, a veces con un pequeño saliente. Todo ello indica una deformación o moldeado distinto, pero no una anatomía diferente. El dedo III suele ser más largo. Dentro del perímetro de icnita se conservan surcos alargados, aislados o bien comunicados que reflejan mejor la forma del pie. La zancada es más bien corta ( $z=0,7$  m).

**Rastro C:** Aquí también existen pequeñas diferencias en los ángulos de los talones. Por lo general el dígito IV suele ser ligeramente más grande que el II. La zancada varía entre 0,6 y 1,20 m.

**TABLA I.**  
Parámetros de las Icnitas del Nivel 1 (Matasejún. Soria)

ICNITA	Long. (cm.)	Anch. (cm.)	Prof. (cm.)	Long. Digtos			Anch. Digtos			Angulo Interdig.		
				II	III	IV	II	III	IV	$\alpha$	$\beta$	
NIVEL 1 RASTRO A	1	22	21	+3	9	13	7	3	4	3	35°	30°
	2			+2,5								
	3	25	14	+4-5	-	-	-	3,5	-	-	25°	-
NIVEL 1 RASTRO B	1	22	23	-3	9	9,5	5	5	3,5	2	35°	35°
	2	22	21	-3	7,5	12	8	4	5	3,7	30°	33°
	3	19	19	-3	6	11,5	6	4,5	4	4	38°	38°
	4	18	19	-2,5	7	11	8	3	4	3	45°	35°
	5	20	22	-2,5	7	9	7	5	4	5	35°	35°
	6	20	27	-2	7	12	11	4,5	4	3,8	35°	70°
	7	-	-	-1,5	8	-	-	6,5	7	-	35°	-
	8	-	-	-1	-	-	9	-	-	4	35°	37°
	9	18	25	-1	-	-	-	-	-	-	45°	45°
NIVEL 1 RASTRO C	1	26	24	-1,5	6	10,5	7	5	5,5	11	30°	35°
	2	21	24	-1	6	9	6,5	5,5	6	7	30°	37°
	3	23	25	-1,5	5	10,5	7,5	7	8	7	30°	35°
	4	20	24	-2	9	13	10	4	5	5	50°	44°
	5	-	-	-1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
	6	24,5	19	-1	7	10	6	3	4,5	3	34°	25°
	7	17,5	19	-1,5	5	10	7	3	3,5	4	46°	43°
Icnitas Sueitas	1	27	22	-1	-	10	8	-	5	6	30°	32°
	2	20	15	-1	-	9	5	-	4	5	30°	35°

**TABLA II.**  
Parámetros de las Icnitas del Nivel 2, Rastro A

ICNITA	Long. (cm.)	Anch. (cm.)	Prof. (cm.)	Long. Digtos			Anch. Digtos			Angulo Interdig.	
				II	III	IV	II	III	IV	$\alpha$	$\beta$
1	-	-	+1,5	-	-	-	-	-	-	-	-
2	26	23	+1,5	-	10	8	-	3	4	30°	35°
3	24	20	0	7	11	5	3,5	4	3,5	32°	28°
4	-	17	0	6	-	-	3,5	-	-	-	-

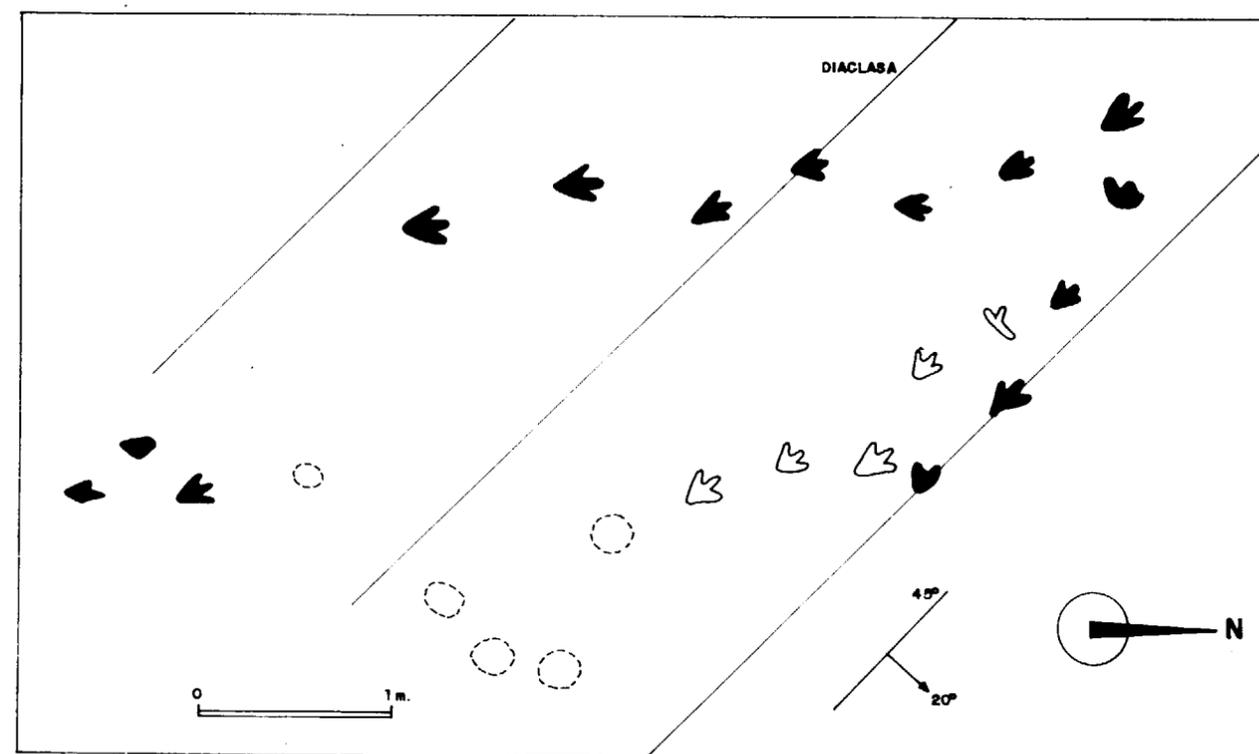


Figura 4.—Icnitas del nivel 1 (afloramiento del Castillejo).

*Icnitas sueltas:* Hay otras icnitas sueltas correspondientes al mismo tipo que las anteriores, con algunas marcas de zarpas.

Así pues, en este nivel hay un grupo de dinosaurios de la misma especie, que se desplazan pausadamente en la misma dirección. Las huellas son todas iguales, tridáctilas, con dedos largos y estrechos, con garras, que corresponden a animales ágiles, seguramente del grupo de los Carnosaurios. En la figura 4 se representa el plano de los rastros de este nivel, y en la figura 3 la icnita tipo más representativa del afloramiento del Castillejo (fig. 5).

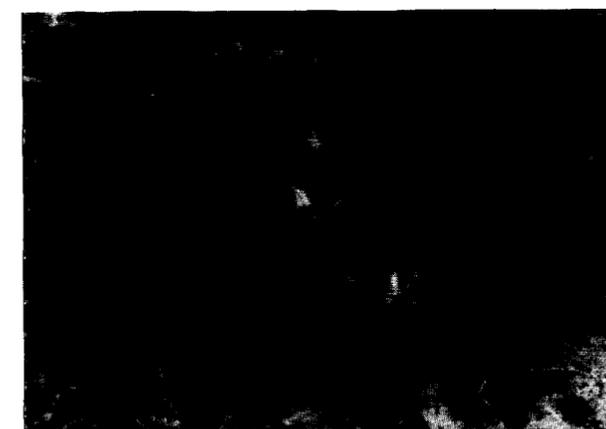


Figura 5.—Rastro B del nivel 1 del afloramiento del Castillejo.

— Nivel 2:

Aparece un solo rastro con cuatro icnitas (tabla II, fig. 6), donde se conservan los moldes y contramoldes, en los que se observan muy bien las sucesivas capas concéntricas

subparalelas a los contornos de las huellas. La zancada es de 1,10 m y las icnitas son iguales a las del nivel anterior.

— Nivel 3 y 4:

Aparecen varias icnitas aisladas del mismo tipo que el nivel 1, algunas improntas y quizá dos marcas de arrastre de cola de dinosaurio (tabla III). Se observa los rebordes en relieve por acumulación de barro en la periferia de una pisada.

— Nivel 5:

Aparece un rastro de icnitas igual al del nivel 1, con zancadas de 0,85 m (tabla IV, fig. 7). En otra capa se encuentran numerosas improntas cóncavas, de tamaños variables (de 0,7 a 0,2 m), así como alguna icnita tridáctila de grandes dimensiones, todas dispuestas al azar. El agua ha borrado en muchas de ellas los contornos reales de las pisadas, dando lugar a improntas redondas, algo más anchas que largas. Tanto unas como otras tienen forma elipsoidal en forma de haba. Algunas presentan caracteres de verdadera huella, con la marca de tres dedos cortos, anchos y acaba-

dos en punta redondeada. Son de tipo plantigrado y seguramente pertenecen a un dinosaurio pesado y herbívoro, quizá del grupo de los Iguanodontes (fig. 8).

Además se reconocen huellas y dedos aislados semejantes a los del primer nivel, pertenecientes a dinosaurios depredadores.

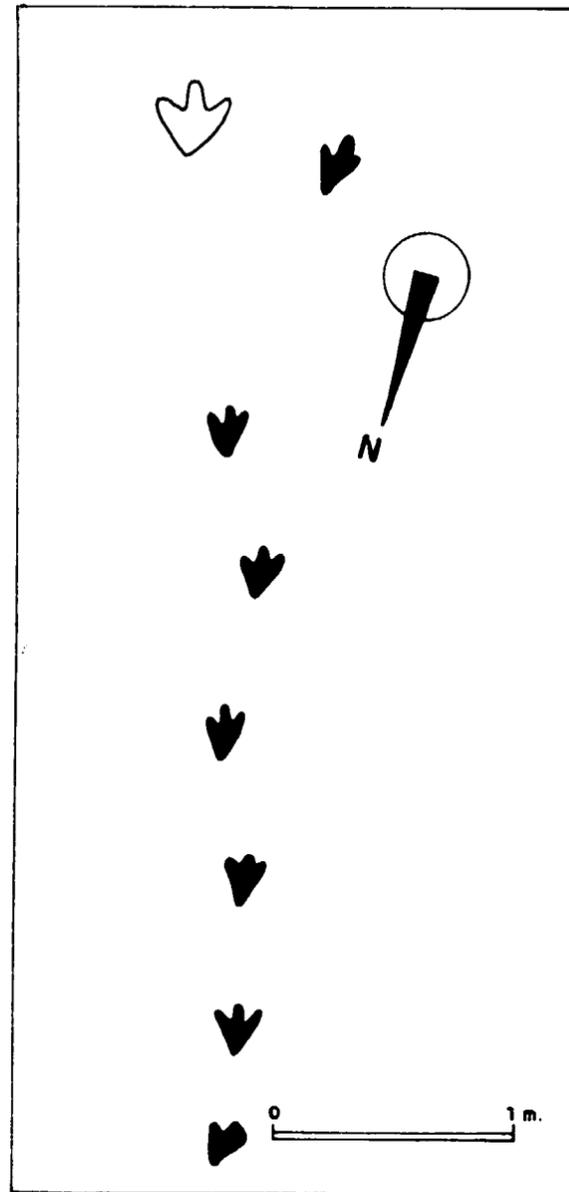
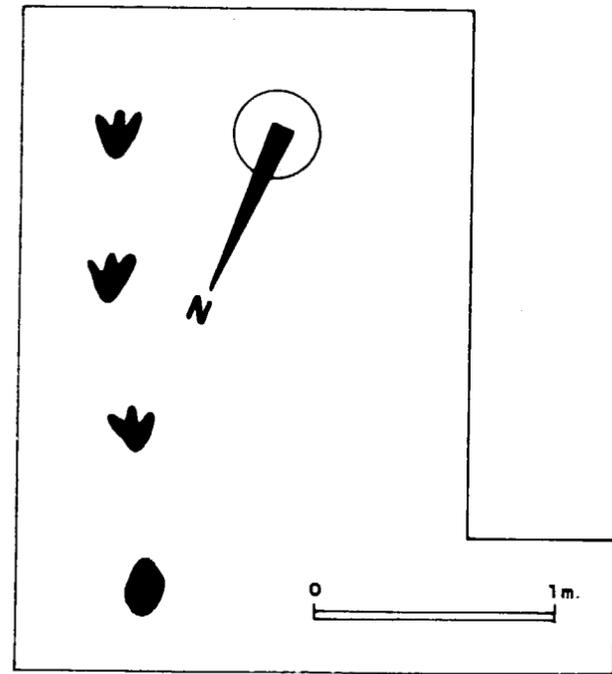


Figura 6.—Rastro A del nivel 2 del afloramiento del Castillejo.

Figura 7.—Rastro A del Nivel 5 del Castillejo.

**TABLA III.**  
Parámetros de las Icnitas del Nivel 4, Icnitas aisladas

ICNITA	Long. (cm.)	Anch. (cm.)	Prof. (cm.)	Long. Digitos			Anch. Digitos			Angulo Interdig.	
				II	III	IV	II	III	IV	α	β
1	30	30	-0,5	5	8	6	7	8	7	30°	30°
2	18	17	-0,9	4	8	3	5	5	3	35°	35°

**TABLA IV.**  
Parámetros de las Icnitas del Nivel 5

ICNITA	Long. (cm.)	Anch. (cm.)	Prof. (cm.)	Long. Digitos			Anch. Digitos			Angulo Interdig.		
				II	III	IV	II	III	IV	α	β	
NIVEL 5 RASTRO A	1	-	-0,5	-	-	-	-	-	-	-	-	
	2	22	20	-2	5	7	5	3	4	3	35°	35°
	3	-	-	+1	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	17	16	-0,5	5	0,5	-	2,5	3	-	37°	40°
	5	23	17	-4	7	13	3	4,5	6	1,5	35°	30°
	6	20	-	-1	-	10	7	-	3,5	4	-	35°
	7	26	22	-3	-	-	-	-	-	-	-	-
Icnitas Sueitas	1	27	28	-0,5	11	13	-	6	6	-	35°	-
	2	20	15	-1	6	10	6	2	3	4	30°	60°
	3	20	16	-0,25	11	9	5	3	2	3	27°	20°

**TABLA V.**  
Parámetros de las Icnitas de los Afloramientos de la Sierra y de la Haya

ICNITA	Long. (cm.)	Anch. (cm.)	Prof. (cm.)	Long. Digitos			Anch. Digitos			Angulo Interdig.		
				II	III	IV	II	III	IV	α	β	
La Sierra	1	34	34	-1	14	13	12	9	6	7	-	-
La Haya	1	37	32	-1	10	19	11	8	8	9	30°	30°

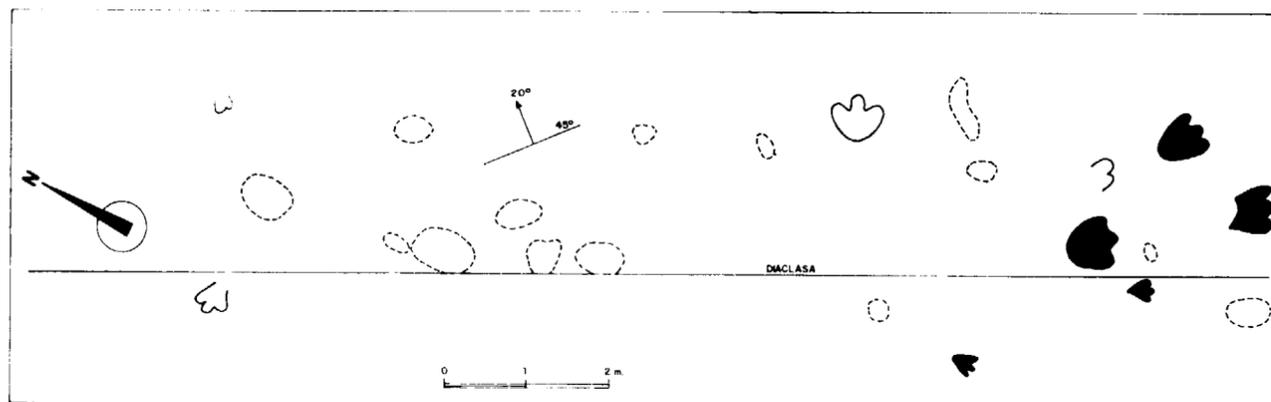


Figura 8.—Icnitas e improntas de nivel 5 del afloramiento del Castillejo.

#### Afloramiento de la Sierra

Desde el punto de vista estratigráfico, este afloramiento se sitúa por debajo del yacimiento del Castillejo. Se trata también de una sucesión de lutitas y areniscas, cuarteadas por diclasas ortogonales y buzando 15° a 20° hacia el NE.

Aparecen 10 ó 12 improntas de distinto tamaño, aunque predominan las superiores a 0,4 m; son muy parecidas a las del nivel 5 del afloramiento del Castillejo. Se reconocen fácilmente por tener forma cóncava y están recubiertas de una pátina negra brillante con grietas de barro incipientes dentro de las concavidades. Su disposición es irregular y en general están mal conservadas y erosionadas por la intemperie, aunque se adivinan los contornos circulares, elípticos o en forma de haba, con tres salientes redondeados correspondientes a los dedos de un dinosaurio plantígrado, seguramente del grupo de los Iguanodontes. Hay otras icnitas mal definidas, tridáctilas, pertenecientes a un carnívoro con zarpas (tabla V).

#### Afloramiento de la Fuente de la Haya

Sobre lutitas y areniscas con rizaduras y grietas de barro aparecen diversas improntas ovoidales y circulares grandes recubiertas de una pátina negra. Hay además dos icnitas bien conservadas, una de las cuales pertenece a un dinosaurio carnívoro semejante al tipo del nivel primero del Castillejo. La otra es completamente distinta a las encontradas en Matasejún y se asemeja mucho al tipo 1 de las del yacimiento de Bretún

(AGUIRREZABALA y VIERA, 1980), perteneciente a un depredador de gran talla (tabla V).

#### CONCLUSIONES

Atendiendo a la forma, se diferencian tres clases de icnitas de dinosaurios. La principal y más abundante es una icnita tridáctila, estilizada, de talón estrecho, dedos finos y alargados sin almohadillas antropodiales ni tejido interdígital. Corresponde a un carnívoro dotado de garras finas, que puede ser un Therópodo del grupo de los Coelurosauria, de talla mediana. Se podría asemejar al tipo 3 de Bretún, aunque aquí la zancada es más pequeña y más variable. Hay además unas pocas icnitas e improntas de tamaño grande, que ocupan la mayor parte de la planta. Tienen forma semicircular, con los tres dedos cortos, anchos y redondeados. Pertenecen a un dinosaurio más pesado, sin garras, seguramente a un herbívoro tipo Iguanodón. Finalmente aparece una sola icnita tridáctila que atribuimos a un depredador de mayor talla que los del primer tipo, aunque del mismo grupo.

El ambiente se desarrolló en un medio de sedimentación playero, seguramente deltaico, donde se deducen periodos de inundación y estancamiento en aguas someras de distinta energía y medio reductor, seguido de sequías. Todo ello se refleja en la alternancia sucesiva de areniscas y lutitas y en las numerosas marcas de sedimentación. Algunas icnitas de Iguanodón parecen estar impresas bajo el agua.

#### REFERENCIAS

- AGUIRREZABALA, L. M., y VIERA, L. I. (1980): *Icnitas de dinosaurios en Bretún (Soria)*. Munibe, 32, núm. 3-4, pp. 257-279.
- AGUIRREZABALA, L. M., y VIERA, L. I. (1983): *Icnitas de dinosaurios en Santa Cruz de Yanguas (Soria)*. Munibe, 35 (1-2), 1-13.
- AGUIRREZABALA, L. M.; TORRES, J. A., y VIERA, L. I. (1985): *El Weald de Igea (Camerós - La Rioja)*. *Sedimentología, Bioestratigrafía y Paleocnología de grandes reptiles (Dinosaurios)*. Munibe, núm. 37, pp. 111-138.
- BEUTHER, A.; DAHM, H.; KNEUPER HAAK, F.; MENSINK, H., y TISCHER, G. (1965): *Der Jura und Wealden in Nordost-Spanien*. *Beih. Geol. Ib.*, tomo 44, Hannover, 225 pp.
- CASANOVAS, M. L., y SANTAFE, J. V. (1971): *Icnitas de reptiles mesozoicos en la provincia de Logroño*. *Acta Geológica Hispánica*, vol. 6, núm. 5, pp. 139-142.
- CASANOVAS, M. L., y SANTAFE, J. V. (1974): *Dos nuevos yacimientos de icnitas de dinosaurios*. *Acta Geológica Hispánica*, vol. 3, núm. 3, pp. 88-91.
- Colectivo Arqueológico Salense (1986): *Icnitas de Dinosaurios en Salas de los Infantes (Burgos)*. C.A.S., 53 pp.
- Colectivo Arqueológico Salense (1988): *Icnitas de Dinosaurios en Regumiel de la Sierra (Burgos)*. C.A.S., 44 pp.
- DÍAZ, E.; PINA, C. M., y PONCE, P. (1990): *Estudio de unas trazas icnológicas en el Cretácico Inferior de San Vicente de Robres (La Rioja)*. *Geogaceta*, 7, 78-81.
- Instituto Geológico y Minero de España (1981 a): *Mapa Geológico de España*. E=1/50.000, hoja núm. 319 (Agueda). Hoja y Memoria. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1981 b): *Mapa Geológico de España*. E = 1/50.000, hoja núm. 318 (Almarza). Hoja y Memoria. Madrid.
- Instituto Geológico y Minero de España (1981 c): *Mapa Geológico de España*. E = 1/50.000, hoja núm. 280 (Enciso). Hoja y Memoria. Madrid.
- MORATALLA GARCIA, J. J. (1987): *Iconología de dinosaurios en el Cretácico Inferior del área de Cameros (La Rioja)*. Tesina de Licenciatura. Universidad Autónoma de Madrid.

PALACIOS, P., y SANCHEZ LOZANO, R. (1985): *La formación wealdense en las provincias de Soria y Logroño*. *Bol. Com. Mapa Geológico de España*, núm. 12, Inst. Geol. y Min. de España.

ROYO Y GOMEZ, J. (1929): *Les vertebres du facies wealdien espagnol*. *Compt. Rend. XIV. Cong. Geol. Int.*, pp. 3-6.

SAENZ GARCIA, C. (1932): *Notas para el estudio de la facies wealdica española*. Asociación Española para el Progreso de las Ciencias. Congreso de Lisboa, Sección IV, pp. 59 a 76. Madrid.

SAENZ GARCIA, C. (1942): *Notas y datos de estratigrafía española: dos nuevos yacimientos de fósiles de agua dulce en el Wealdense soriano*. *Bol. de la Real Soc. Esp. de Historia Natural*, tomo XL, pp. 105 a 108.

SAENZ GARCIA, C. (1949): *Datos para el estudio de la Paleografía del Jurásico Superior y del Cretácico Inferior en el NE de España*. Publicaciones de la Asesoría del Ministerio de Obras Públicas, núm. 1, pp. 3 a 12. Madrid.

SAENZ GARCIA, C. (1957): *Observaciones acerca de la extensión de las facies lacustres del Cretácico Superior y del Eoceno a lo largo de la Cordillera Ibérica*. *Las Ciencias*, año XXII, pp. 689 a 697.

SANZ, J. L. (1983): *A nodosaurid Ankylosaur from the lower Cretaceous of Salas de los Infantes (Burgos, Spain)*. *Geobios*, 15 (6), pp. 615-621. Lyon.

SANZ, J. L. (1984); MORATALLA, J. J., y CASANOVAS, M. L. (1985): *Trazo icnológico de un dinosaurio iguanodóntido en el Cretácico Inferior de Cornago (La Rioja, España)*. *Est. Geológicos*, 4, pp. 85-91.

TISCHER, G. (1966): *El delta wealdico de las Montañas Ibéricas Occidentales y sus enlaces tectónicos*. *Not. y Com. IGME*, t. 81, pp. 53-78. Madrid.

VIERA, L. I., y TORRES, J. A. (1979): *El wealdico de la zona de Enciso (Sierra de Cameros) y su fauna de grandes reptiles*. *Munibe*, año 31, fascículo 1/2, pp. 141-157.

VIERA, L. I., y AGUIRREZABALA, L. M. (1982): *El Weald de Munilla (La Rioja) y sus icnitas de Dinosaurios*. *Munibe*, 34 (4), 245-270.

VIERA, L. I.; TORRES, J. A., y AGUIRREZABALA, L. M. (1984): *El Weald de Munilla (La Rioja) y sus icnitas de Dinosaurios (II)*. *Munibe*, 36, 3-22. San Sebastián.

Original recibido: Diciembre de 1992.

Original aceptado: Julio de 1993.

# Reflectancia en rocas en función de su litología y fábrica interna.

## IV. Reflectancia en relación con los elementos de la fábrica interna de las rocas y distintos tipos de metamorfismo en el CEG. Su expresión en imágenes Thematic Mapper y análisis espacial de datos estructurales y microestructurales.

Por A. RIAZA GARCIA

### RESUMEN

El Complejo esquistos-grauváquico, con su gran monotonía litológica en contacto con un cuerpo granítico, proporciona la oportunidad de analizar espectralmente rasgos sutiles por efecto de la interacción entre metamorfismo regional, térmico y dinámico. De igual modo, la representación de datos estructurales tomados en el campo por medio de un sistema de información geográfico ilustra y facilita el análisis estructural en este conjunto afectado por una historia geológica compleja, en el que las técnicas cartográficas convencionales son especialmente difíciles de aplicar.

Al análisis integrado antes descrito de lineamientos y datos estructurales de campo en el complejo esquistos-grauváquico, se ha acompañado estimaciones de reflectancia espectral en relación a los efectos del metamorfismo dinámico débil, hecho que supone una aportación metodológica al trabajo tradicionalmente realizado con imágenes en geología estructural.

Los estudios espectrales tradicionales realizados sobre rocas toman en cuenta su composición mineralógica, y como máximo el tamaño de grano de las fracciones ensayadas si se trata de muestras molidas. Sólo se ha realizado algún estudio con un enfoque textural en carbonatos. En este trabajo se ha ensayado la variación de reflectancia espectral en pelitas y grauvacas en función de su fábrica interna, tanto en laboratorio como en imágenes, y en relación a los efectos combinados del metamorfismo regional, térmico y dinámico. La actitud regionalmente constante de los elementos estructurales más importantes de la fábrica interna de las rocas en el área de estudio no permite su generalización a la cartografía de zonas en que esta actitud varíe, pero abre indudablemente un campo de aplicación en el uso de imágenes en geología estructural inexplorado hasta el momento por la comunidad científica internacional.

*Palabras clave:* Reflectancia, Thematic Mapper, Metamorfismo térmico, Metamorfismo dinámico, Petrología estructural.

### ABSTRACT

Precambrian sediments in the Central Iberian Hesperian Massif consist of monotonous interbedded schist and greywacke, deformed both during the prehercynian and hercynian orogeny. It spreads over vast plains, well displayed in satellite imagery, and offers difficult and cumbersome mapping by conventional methods.

Image processing of thematic mapper data suggests effects connected to both thermal metamorphism and shear-zone related dynamic metamorphism. Fabric analysis on thin section of rock samples represented through a GIS define more intensive deformation in areas with distinct spectral features in the imagery. This is confirmed by ground structural data and laboratory spectra of soil samples.

Steady regional attitudes of structural elements developed during the main hercynian deformation suffered disorganization within the late hercynian shear zones. Laboratory spectra in the visible and near-infrared on different surfaces of the same sample, referring to its fabric elements, offer new potential to map areas where fabric elements display different attitudes in a homogeneous lithological background.

Thus, reflectance shown by imagery and laboratory data proves to be a useful tool for mapping areas with different deformation intensity as a guide line in exploration of structural variations for geological mapping.

*Key words:* Reflectance, Thematic Mapper, Thermal metamorphism, Dynamic metamorphism, Structural petrology.

(\*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid.

### INTRODUCCION

La monotonía litológica del CEG ha servido de marco para un estudio sobre cartografía de efectos térmicos producidos por la intrusión de granitos (ROWAN et al., 1987), apoyado en diferencias de reflectancia producidas por la presencia de moscovita y material carbonoso en los suelos desarrollados sobre corneanas y pizarras mosquadas.

La reconstrucción de la disposición geométrica de los materiales en el CEG sólo puede intentarse a base de un registro sistemático en afloramientos puntuales de direcciones y ángulos de buzamiento de superficies de estratificación, esquistosidades, polaridades estratigráficas, vergencias relativas de unas superficies respecto a otras, ejes de pliegues con especificación de su morfología y relación temporal. La red de fracturas puede extraerse en parte de lineamientos cartografiados sobre imágenes.

Como se ha detallado en el estudio de estructuras menores y microestructuras, las pizarras y grauvacas del CEG han sufrido un plegamiento apretado con aparición de una esquistosidad principal bien desarrollada muy penetrativa.

Acompaña a la formación de esquistosidad el crecimiento de micas orientadas preferentemente a lo largo de los planos de esquistosidad, situándose sus planos basales paralelos a los mismos. Siendo las micas algunos de los minerales repetidamente citados en la literatura por sus características espectrales críticas en la interpretación de imágenes de satélite, este trabajo intenta explorar la variabilidad en la reflectancia de rocas con una fábrica interna definida, registrada desde posiciones distintas respecto a la citada fábrica.

Los procesos de metamorfismo dinámico modifican la textura de las rocas de modo diferente al metamorfismo regional. La reflectancia de las rocas así deformadas es también susceptible de recoger estas diferencias texturales. En grandes áreas ocupadas por materiales litológicamente monótonos como el CEG, estas diferencias pueden dar lugar a la cartografía de regiones con una disposición distinta de los elementos de la fábrica basada en el tratamiento de imágenes de satélite.

Las imágenes registradas desde satélites con sis-

temas electrónicos consisten en distribuciones bidimensionales de datos numéricos comprendidos entre 0 y 255, que se traducen visualmente en 256 intensidades de gris, desde el negro al blanco, simulando una fotografía.

Las imágenes Thematic Mapper utilizadas en este trabajo reúnen datos de reflectancia en siete canales, de los que tres corresponden al visible, otros tres al infrarrojo cercano, y un séptimo al infrarrojo térmico. Cada uno de estos canales constituye una capa de datos (JENSEN, 1986).

La técnica del tratamiento digital de imágenes permite manipular estadística y algebraicamente esta información multispectral (CONDIT y CHAVEZ, 1979; SCHOWENGERDT, 1983), y producir nuevas imágenes en las que la composición de color contribuye a resaltar características espectrales de la superficie terrestre, en nuestro caso, áreas del Complejo esquistos-grauváquico afectadas por distintos procesos metamórficos.

### METODO DE ESTUDIO

Pelitas y grauvacas se intercalan en intervalos centimétricos e incluso milimétricos en la serie estratigráfica, por lo que se han seleccionado 13 muestras de pelitas y 10 de grauvacas que presentan esquistosidades bien desarrolladas al observarlas en muestra de mano. Durante el curso de las medidas de reflectancia se ha tenido en cuenta tamaño de grano, y homogeneidad relativa de composición basados en observaciones al microscopio en lámina delgada, y en muestra de mano.

Para evitar interferencias con diferencias en reflectancia producidas por efectos térmicos relacionados con la intrusión de los granitos, todas las rocas estudiadas proceden de áreas donde estos efectos no son registrados por las imágenes Thematic Mapper.

Con el objeto de obtener láminas delgadas, se han efectuado dos cortes con sierra, ambos perpendiculares a las subparalelas superficies de estratificación y esquistosidad principal. Las dos secciones forman un ángulo cercano a 90° entre sí, siendo una de ellas paralela a la lineación de intersección entre las superficies de estratificación y de esquistosidad principal, y la segunda

perpendicular a ella, y paralela a los ejes de la esquistosidad de crenulación posterior (fig. 34).

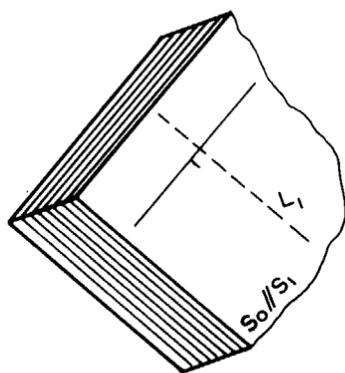


Figura 34.—Posición de secciones cortadas para lámina delgada en muestras de mano referidas a los elementos de la fábrica interna de la roca.

$S_0$  Superficie de estratificación subparalela a  $S_1$ , superficie de esquistosidad principal.

$L_1$  Lineación de intersección entre las superficies de estratificación y de esquistosidad principal.

Tanto las superficies cortadas para lámina delgada, como las superficies de estratificación tal como aparecen en el afloramiento, se han sometido a medidas de reflectancia difusa con un espectrofotómetro Beckman UV 5240 provisto de una esfera integradora en longitudes de onda comprendidas entre 0.4 y 2.5  $\mu\text{m}$ .

En un principio, y para ensayar posibles diferencias, se tomaron medidas de reflectancia situando la ranura de observación del instrumento en dos posiciones distintas sobre cada superficie a medir, paralela y perpendicular, respectivamente, a la lineación de intersección entre las superficies de esquistosidad principal y estratificación. Comprobada la similitud de reflectancias entre ambas medidas sobre una misma superficie, se efectuó en adelante una sola medida por superficie, situando la ranura de observación del instrumento paralela a la lineación de intersección entre las superficies de estratificación y esquistosidad principal.

Sobre las muestras de rocas se han tomado un número aproximado de 120 medidas de reflectancia, así como en treinta muestras de suelos, re-

cogidas asimismo en áreas no afectadas por metamorfismo de contacto.

A fin de poner de manifiesto diferencias en reflectancia en rocas con leves variaciones litológicas, así como en superficies distintas referidas a la fábrica interna de la roca con fiabilidad estadística, se han promediado medidas espectrales afines con arreglo a distintos criterios, que se detallan más adelante.

Para extraer posibles diferencias de significado geológico, se ha tratado digitalmente una imagen Thematic Mapper con fecha de 3 de agosto de 1985. Puesto que los datos espectrales de laboratorio se limitan al intervalo entre 0.4 y 2.5  $\mu\text{m}$ ., sólo se han tenido en cuenta los canales del visible y el infrarrojo cercano, dejando al margen, por lo tanto, el infrarrojo térmico.

El programa de tratamiento de imágenes de uso público desarrollado por la NASA empleado, escrito en FORTRAN, está instalado en un microordenador que funciona autónomamente con dos puestos de trabajo. La unidad de proceso central posee una velocidad de proceso de 16.7 MHz., acelerador vectorial y acelerador de coma flotante, 478 Megabytes de capacidad de almacenamiento en disco duro, y cuenta con un sistema operativo UNIX. La resolución espacial del monitor de presentación es de 910 por 1152, y 10 bits de resolución de color, que proporciona 1024 colores, con 256 niveles de gris por cañón en 12 planos, de los cuales dos están disponibles para la superposición de gráficos.

Las copias en papel se han obtenido fotografando la pantalla del monitor de presentación con una cámara fotográfica y procedimientos de impresión convencionales.

Para facilitar la interpretación de datos estructurales de campo, recogidos en un número aproximado de 500 estaciones, se ha construido una base de datos espacial con un sistema de información geográfico, referido a una red de coordenadas UTM.

Los lineamientos, cartografiados manualmente sobre una copia en papel de una imagen TM en blanco y negro, se han digitalizado para incorporarlos a la base de datos.

Los cortes geológicos se han realizado por métodos convencionales a partir de representaciones

de direcciones y buzamientos de los distintos elementos estructurales sobre un mapa topográfico. Para las proyecciones estereográficas se ha utilizado un programa sencillo apoyado en un ordenador personal.

#### REFLECTANCIA DE ROCAS DETRITICAS EN EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVAQUICO EN EL VISIBLE E INFRARROJO CERCANO OBTENIDAS EN LABORATORIO

##### Propiedades espectrales de pelitas y grauvacas

Pelitas y grauvacas son rocas formadas por acumulación de material detrítico en el fondo de cuencas sedimentarias. Las pelitas son rocas de grano fino con participación arcillosa abundante, y materia orgánica en proporciones variables. Las grauvacas están formadas por clastos de mayor tamaño de grano, mayor abundancia de cuarzo y heterogeneidad en la composición de los clastos que las componen, entre los que se cuentan fragmentos de roca.

Las reflectancias observadas sobre las superficies de estratificación de las pelitas y grauvacas del CEG describen curvas muy similares (figura 35). Son relativamente planas, con una meseta entre 1.5 y 1.8  $\mu\text{m}$ ., y caída de reflectancia a ambos lados de la misma, más acusada hacia el visible.

Los dos grupos de rocas registran absorciones de energía electromagnética en las mismas longitudes de onda. Los minerales arcillosos y las micas proveen absorciones asociadas a moléculas de agua en 1.4 y 1.9  $\mu\text{m}$ ., y a grupos  $\text{OH}^-$  en huecos dioctahédricos en 2.2  $\mu\text{m}$ ., además de una insinuación de absorción en 2.3  $\mu\text{m}$ . debida a grupos  $\text{OH}^-$  en huecos trioctahédricos (HUNT y SALISBURY, 1976). Tanto la caída hacia el azul, como la absorción en 0.475  $\mu\text{m}$ ., se deben a las transiciones electrónicas entre los cationes ferroso y férrico.

La materia orgánica presente en las pizarras por su depósito en un ambiente reductor es responsable de una reducción en reflectancia global, si bien la discusión sobre este aspecto se reserva para más adelante.

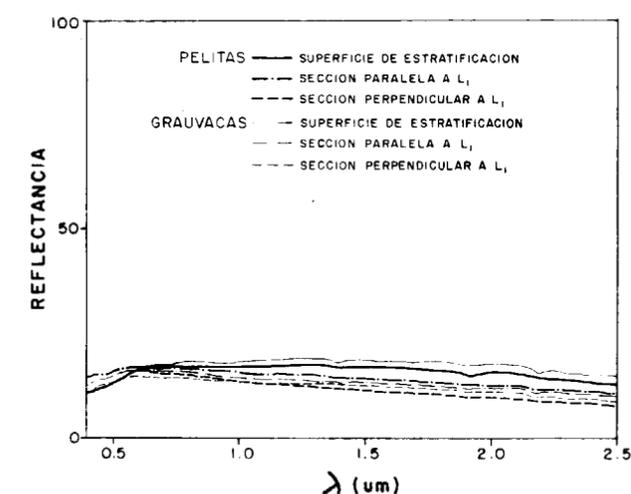


Figura 35.—Curvas espectrales promedio sobre pelitas y grauvacas medidas sobre superficies de estratificación y superficies cortadas con sierra para lámina delgada paralelas y perpendiculares respectivamente a la lineación de intersección entre las superficies de estratificación y esquistosidad principal (ver fig. 34).

##### Efectos relacionados con la fábrica interna de las rocas producida por metamorfismo regional

Las estructuras planares y lineares presentes en las rocas han sugerido la observación de reflectancias en secciones orientadas respecto a dichas estructuras.

Las presiones dirigidas que actúan durante el metamorfismo regional producen el aplastamiento y cizallamiento de las rocas, con la aparición de planos de discontinuidad perpendiculares a la dirección del esfuerzo principal (SIDDANS, 1972; WILLIAMS, 1972; ETHERIDGE y LEE, 1975). Por efecto de la presión se forman cristales nuevos de micas, que crecen cristalográficamente orientados con sus planos basales paralelos a la superficie de esquistosidad (KNIPE, 1981; GREGG, 1985). Al observar una sección paralela a esta superficie, el área cubierta por filosilicatos es mayor que en una superficie perpendicular a la misma.

La reflectancia espectral en las muestras cortadas con sierra es ligeramente distinta de la que producen las superficies de estratificación tal y como aparecen en el afloramiento (fig. 35). Tienen en común la caída hacia el azul, que se interrumpe en un umbral en 0,55  $\mu\text{m}$ ., donde se inicia

una caída suave de trayectoria rectilínea hacia longitudes de onda más largas. La reflectancia global se reduce por el menor impacto de la meteorización.

Los mínimos de absorción se repiten respecto a las superficies de estratificación. Están bien señalados el mínimo en  $0,475 \mu\text{m}$  debido a las transiciones electrónicas entre los cationes ferroso y férrico, y el hombro en  $0,45 \mu\text{m}$ . En longitudes de onda más largas, las absorciones asociadas a agua molecular y grupos OH persisten, aunque debilitadas respecto a las superficies de estratificación alteradas.

Comparando la reflectancia entre las dos secciones cortadas con sierra, se cumple tanto en pelitas como en grauvacas, que la reflectancia global de la sección paralela a la lineación de intersección es mayor que la sección perpendicular a ella. Aunque el efecto es poco notorio en las curvas promedio que se muestran en la figura, por la proximidad en la reflectancia global de las dos secciones, se cumple esta relación de reflectancias en todas las medidas realizadas por muestra. Ello demuestra que un área de exposición mayor de micas en una misma muestra de roca produce un aumento de la reflectancia global.

Aunque imposible de cuantificar en este estudio por la debilidad de los mínimos de absorción presentados, es probable que estos mínimos se intensifiquen o debiliten acompañando a la reflectancia global. De este modo, una misma roca, en la que los elementos de la fábrica adopten distintas posiciones en el espacio, son susceptibles de producir diferencias espectrales registrables por sensores aeroportados.

Pelitas y grauvacas de aspecto comparativamente más oscuro no recogen la caída en el visible (fig. 36) que reflejan de modo general el conjunto de las rocas en las secciones cortadas por sierra, sino que la reflectancia decae sin interrupción en trayectoria rectilínea desde  $0,4$  a  $2,5 \mu\text{m}$ . En varias ocasiones se ha reseñado el efecto oscurecedor de los rasgos espectrales por presencia de materia orgánica (CROWLEY, 1986; CLARK, 1983). Siendo las curvas de reflectancia tan planas e inexpresivas como las de las pelitas y grauvacas estudiadas, la desaparición de los únicos rasgos acentuados en rocas ricas en materia orgánica apunta en la misma dirección.

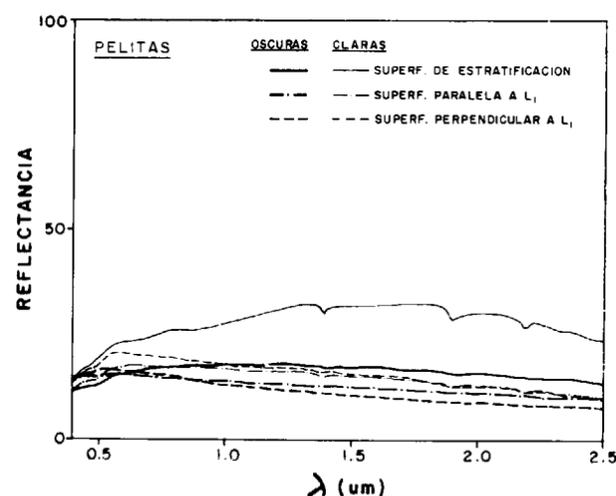


Figura 36.—Curvas espectrales en pelitas claras y oscuras medidas sobre superficies de estratificación y superficies cortadas con sierra para lámina delgada, paralelas y perpendiculares respectivamente a la lineación de intersección entre las superficies de estratificación y esquistosidad principal (ver fig. 34).

El efecto anulador de las absorciones por hierro en el azul del visible no se detecta en la reflectancia recogida en superficies de estratificación de las pelitas y grauvacas más abundantes en materia orgánica. La mayor abundancia relativa de minerales de alteración hace predominar en estas superficies la absorción por la presencia de minerales ferruginos.

#### Efectos relacionados con metamorfismo dinámico intenso

Los cambios texturales y mineralógicos producidos en pelitas y grauvacas por metamorfismo dinámico dan lugar a esquistos miloníticos con fuerte heterogeneidad en tamaño de grano. Los clastos grandes, fundamentalmente cuarcíferos y de fragmentos de roca que sugieren una participación de material volcánico, están inmersos en una matriz de grano fino muy micácea.

Los esquistos miloníticos estudiados proceden de los materiales supuestamente precámbricos que cabalgan sobre el paleozoico en el límite entre la Zona Centroibérica y la Zona Sur-Portuguesa al sur de la localidad de Albuquerque.

Las curvas de reflectancia de estas rocas son muy diferentes a las de las pizarras y grauvacas solamente afectadas por metamorfismo regional (fig. 37). Despliegan de manera clara signos de la existencia de materiales ferruginos.

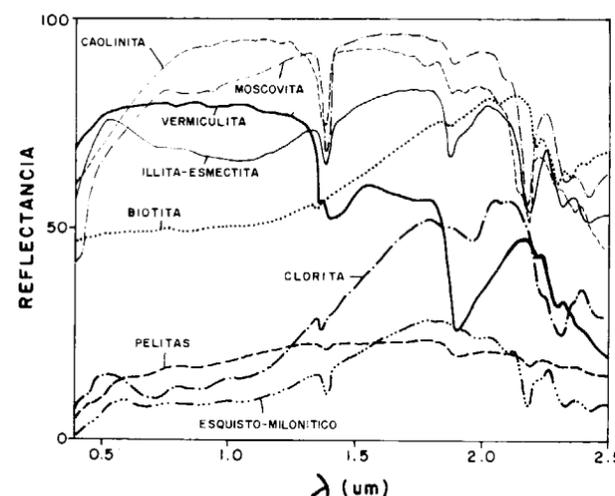


Figura 37.—Curvas espectrales en superficies de estratificación de esquistos miloníticos y varios de sus componentes minerales.

No sólo aparece el mínimo en  $0,475 \mu\text{m}$ , sino dos amplias depresiones separadas por un umbral, la primera centrada en  $0,8 \mu\text{m}$ , debida al catión férrico  $\text{Fe}^{3+}$ , siendo la causa de la segunda, centrada en  $1,0 \mu\text{m}$ , el catión ferroso  $\text{Fe}^{2+}$ . Los amplios mínimos producidos por agua molecular desaparecen, para dar lugar a una absorción estrecha y profunda en  $1,4 \mu\text{m}$ , debida probablemente a moscovita, y una serie de mínimos entre  $1,8$  y  $2,0 \mu\text{m}$ , combinación de la influencia de distintos minerales arcillosos (illita-esmectita, caolinita), y micas (moscovita, caolinita, flogopita...), además del agua contenida en las inclusiones fluidas de los granos de cuarzo.

Las fuertes absorciones en  $2,2$ ,  $2,25$ ,  $2,35$  y  $2,4 \mu\text{m}$  en los esquistos miloníticos se deben a vibraciones de los cationes  $\text{OH}^-$  en huecos dioctahédricos y trioctahédricos vinculados a los minerales arcillosos y las micas (HUNT y SALISBURY, 1976).

#### Efectos relacionados con metamorfismo dinámico débil

El granito de Nisa-Albuquerque aparece en dos cuerpos con morfología y comportamiento espectral diferente, separado por un estrangulamiento. En este punto se distingue en el CEG una franja espectralmente y estructuralmente distinta, como se detallará más adelante, en dirección paralela a la Falla de Alentejo-Plasencia.

Puesto que esta franja es fácilmente identificable en muchas combinaciones realizadas con tratamiento de imágenes, se planteó un estudio de reflectancia realizado sobre rocas y suelos en laboratorio.

Siguiendo las diferencias espectrales observadas en pelitas y grauvacas con mayor o menor contenido en materia orgánica, y en las distintas superficies cortadas en las mismas, se ha mantenido la separación establecida en base a estos criterios, con la intención de no mezclar respuestas supuestamente ocasionadas por las circunstancias antes descritas.

Si tenemos en cuenta la reflectancia medida en superficies de estratificación, la reflectancia global es más baja en las pelitas interiores a la franja que en el exterior (fig. 38). La forma de la reflectancia, tanto en las pelitas claras como en las oscuras, se acerca más a la forma de la curva de las pelitas con materia orgánica en el interior de la franja que en el exterior. Lo mismo se observa en la reflectancia de las grauvacas oscuras, pero no en las grauvacas claras.

Las dos superficies cortadas por sierra en las pelitas oscuras, apuntan a una mayor reflectancia global de las rocas que afloran en el exterior de la franja, mostrando una leve caída en el visible que no está presente en las pelitas oscuras del interior de la franja.

Lo contrario sucede en las pelitas claras en cuanto a reflectancia global, pero no en lo que respecta en la caída hacia el azul en el visible, que sigue siendo menos acusada en el interior de la franja.

En las grauvacas claras, al igual que oscuras, la reflectancia global es mayor dentro de la faja, y la caída hacia el azul en el visible es menos acusada fuera de la franja que dentro.

Teniendo en cuenta solamente la reflectancia

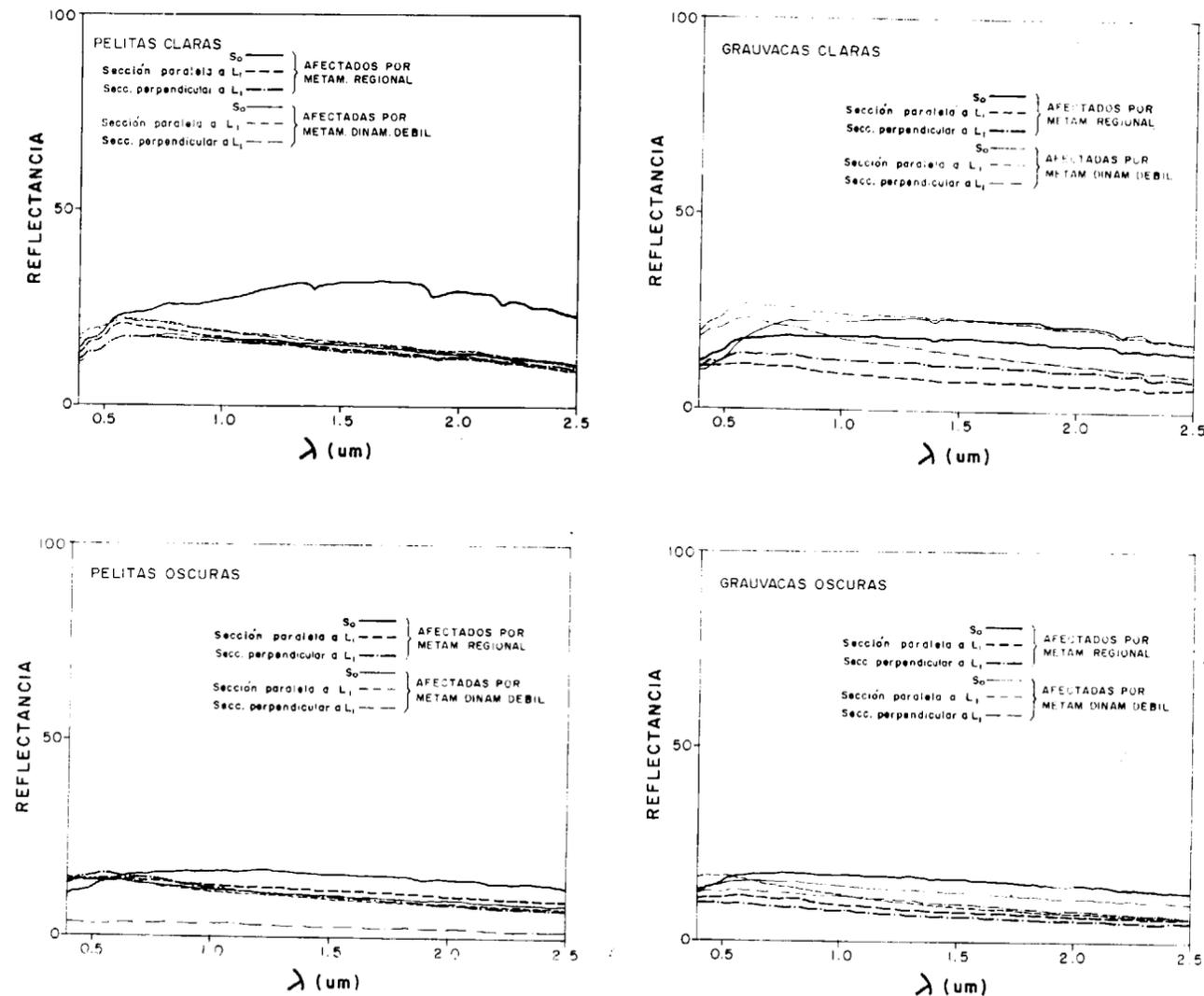


Figura 38.—Curvas espectrales medidas en distintas superficies de pelitas y grauwacas de tono oscuro y claro, afectadas o no por metamorfismo dinámico débil.

correspondiente a las superficies cortadas por sierra que son paralelas a la lineación de intersección entre las superficies de estratificación y esquistosidad (fig. 38), se comprueba que las rocas oscuras experimentan una reducción en la reflectancia global en el interior de la franja. Las rocas claras, por el contrario, no siguen esa tendencia.

Según estas observaciones, pelitas claras y oscuras, y grauwacas oscuras, experimentan una reducción en reflectancia global en sus superficies de meteorización en las rocas que afloran

en el interior de la franja. Es decir, en la reflectancia ofrecida por el afloramiento.

En las secciones cortadas para lámina delgada, la pendiente de la caída hacia el azul en el visible es un rasgo más representativo que la reflectancia global. Esta caída es menos acentuada en las rocas recogidas en el interior de la franja para las pelitas, tanto claras como oscuras, y para las grauwacas oscuras, aunque no para las grauwacas claras.

De este conjunto de observaciones se deduce

que las rocas oscuras, con mayor contenido en materia orgánica, se muestran más sensibles a indicar tendencias similares en reflectancia en rocas recogidas en el interior y exterior de la franja. Estas tendencias se resumen en la reflectancia global menor en el interior de la franja cuando se observa la superficie de estratificación tal como aparece en el afloramiento en el interior de la franja, así como una caída menos pendiente hacia el azul en el visible observada en la reflectancia de las superficies cortadas para lámina delgada; también en el interior de la franja.

Tanto el descenso de reflectancia global como la menor pendiente de la caída hacia el azul en el visible indican diferencias en la cantidad o cualidad de la materia orgánica contenida en las rocas, que se intensifica en el interior de la franja.

Un conjunto de suelos recogidos en zonas alejadas del contacto con el granito de Nisa-Alburquerque (fig. 39) muestran asimismo una reflectancia global más baja en el interior de la franja que en el exterior.

Los suelos se han clasificado de acuerdo con la tabla de colores de Munsell (Munsell Color Co., 1950) asignándoles tres índices, que corresponden respectivamente al tono, valor y cromaticidad. La mayor parte encajan en un tono amarillento, con una pequeña representación de amarillo rojizos. Añadiéndoles los índices de valor y cromaticidad, se clasifican como pardos muy pálidos, pálidos y amarillentos. Según los estudios que relacionan los índices de las tablas de color de Munsell con las propiedades espectrales de los suelos correspondientes (ESCADA-FAL et al., 1989), las variaciones de reflectancia global estarían reflejadas por el parámetro valor en la escala de Munsell. Los «valores» de Munsell para los suelos estudiados son inferiores, indicando mayor oscuridad, en el conjunto de suelos del interior de la franja, que en el exterior.

La misma disminución de reflectancia global, y, por lo tanto, mayor oscuridad cromática, se ha reseñado en los suelos desarrollados sobre corneanas y pizarras mosqueadas, para diferenciarlos de los que se desarrollan en áreas no afectadas por metamorfismo de contacto (ROWAN et al., 1987; ANTON-PACHECO, 1989). En los

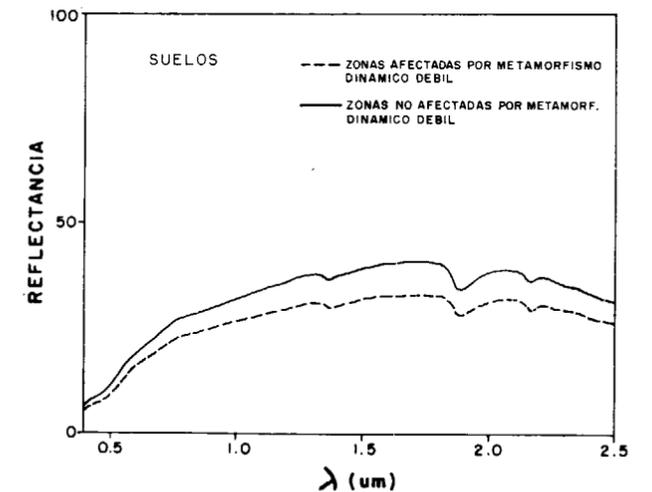


Figura 39.—Curvas espectrales en suelos procedentes de zonas afectadas o no por metamorfismo dinámico débil.

mencionados trabajos se ha atribuido la depresión en reflectancia global a la mayor madurez térmica de la materia carbonosa. Una investigación más amplia es necesaria para estimar los cambios mineralógicos y cristalográficos producidos por aumentos de presión y temperatura en los componentes orgánicos de las rocas, y sus efectos sobre la reflectancia.

#### Cocientes de bandas calculados sobre medidas de reflectancia de laboratorio en longitudes de onda TM

Tres cocientes se han seleccionado como críticos para mostrar las diferencias en rocas claras y oscuras, y sus ligeras diferencias en reflectancia.

El cociente 4/7 (fig. 40) indica la pendiente de la recta desde el visible hacia el infrarrojo en las secciones cortadas por sierra. Las rocas oscuras muestran en conjunto valores más altos que las claras. Teniendo en cuenta solamente las claras, las pelitas también registran una pendiente mayor hacia el infrarrojo que las grauwacas, que se manifiesta en valores superiores en el cociente 4/7.

Los cocientes 3/1 y 2/1 miden la pendiente de la caída hacia el azul, más acusada en rocas cla-

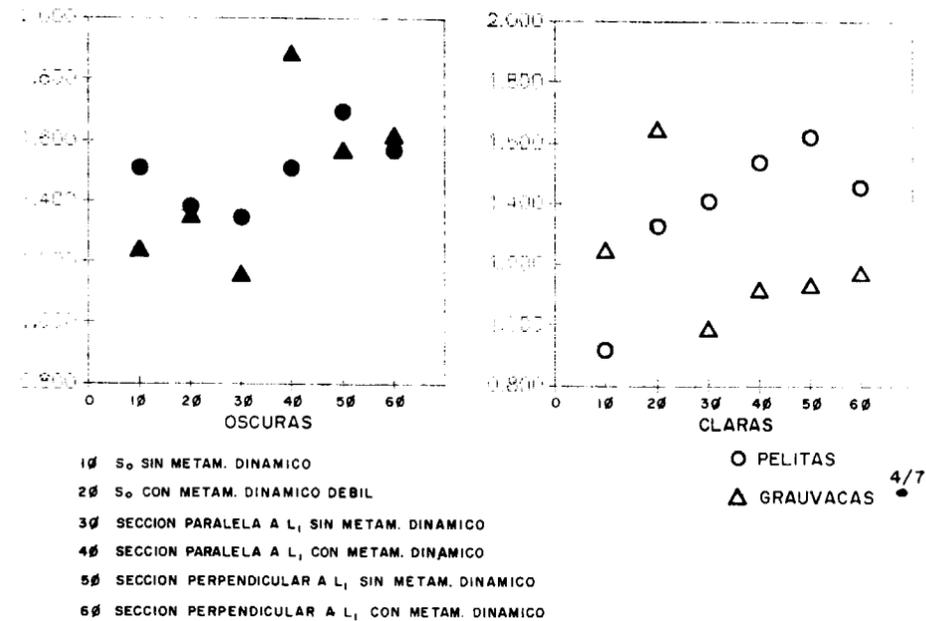


Figura 40.—Valores calculados sobre curvas espectrales de laboratorio en los intervalos de longitud de onda de los canales del Thematic Mapper, para el cociente 4/7, en pelitas y grauvacas oscuras y claras.

ras que oscuras. Por lo tanto, los valores respectivos para ambos cocientes (fig. 41) son más bajos en las rocas oscuras que las claras. De nuevo, y de modo especial en el cociente 2/1, se repite que entre las rocas claras, las pelitas también presentan valores más bajos que las grauvacas.

Las rocas interiores a la franja deberían de cumplir las mismas relaciones respecto a las exteriores, presentando cocientes 3/1 y 2/1 inferiores para medidas en superficies equivalentes. Esto sólo es verdad en pelitas en secciones cortadas por sierra paralelas a la lineación de intersección principal, pero no en grauvacas ni en otras secciones medidas en pelitas.

Los cocientes calculados sobre medidas en suelos no siguen las mismas pautas que las rocas en los cocientes mencionados, ni siquiera en el visible. Para apreciar diferencias sensibles en reflectancia, hay que acudir a las combinaciones reseñadas en trabajos anteriores (ROWAN et al., 1987).

**Reflectancia observada en imágenes Thematic Mapper**

Como se describe más pormenorizadamente más adelante, las imágenes Thematic Mapper reflejan reflectancias menores en las regiones afectadas intensamente por el metamorfismo de contacto (fig. 42). Los números digitales extraídos en cada una de las tres áreas que las imágenes señalan como afectadas por distinta madurez térmica, se han contrastado en función de su posición respecto a la franja transversal al estrangulamiento del granito.

Según las medidas realizadas en laboratorio sobre suelos en un corte transversal al recorrido de la franja mencionada, la reflectancia en imágenes debería presentar relaciones similares, aunque con menor intensidad.

En las zonas más alejadas del granito, de donde proceden los suelos estudiados en laboratorio, los números digitales en el interior de la franja son efectivamente inferiores al exterior en el intervalo de longitudes de onda del visible, pero la relación se invierte en el infrarrojo cercano.

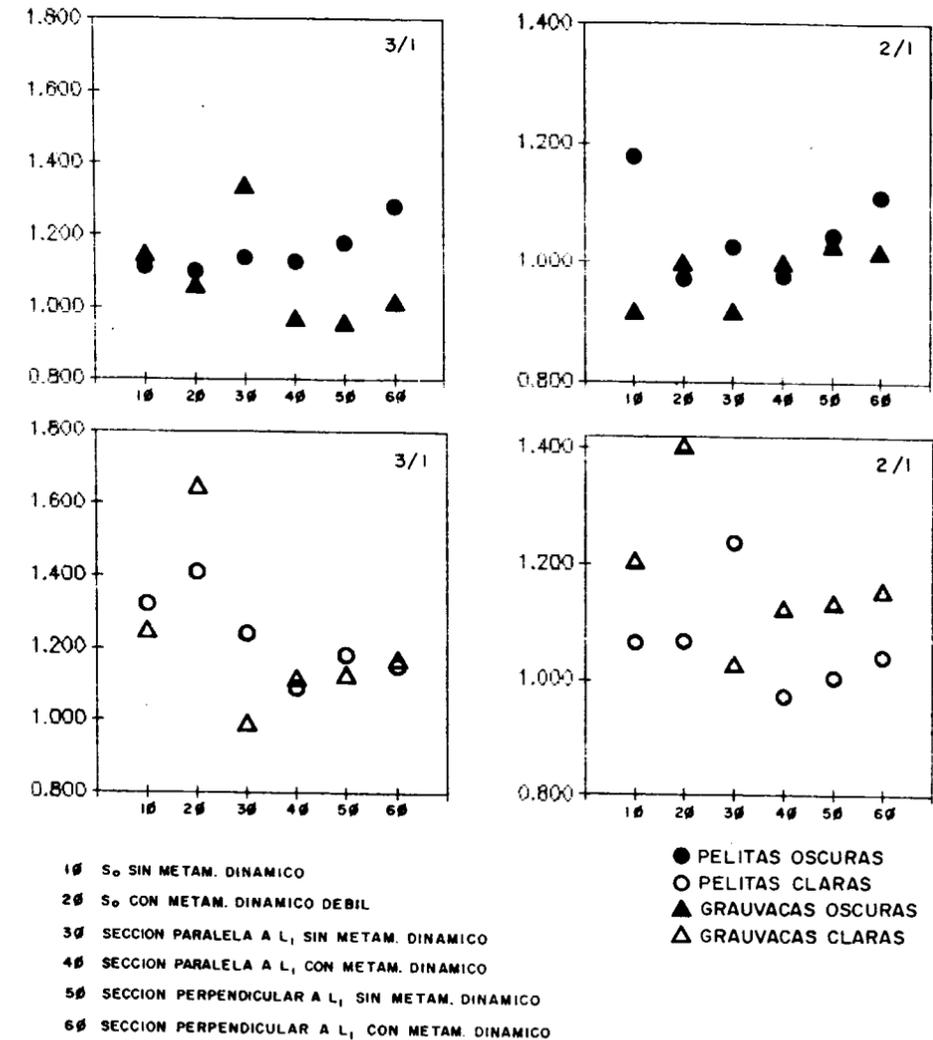


Figura 41.—Valores calculados sobre curvas espectrales de laboratorio en los intervalos de longitud de onda de los canales del Thematic Mapper, para los cocientes 3/1 y 2/1, en pelitas y grauvacas oscuras y claras.

La reflectancia en imágenes es siempre menor en el interior de la franja respecto al exterior, en las áreas ocupadas por pizarras mosqueadas. En las áreas sobre corneanas, la relación es inversa en la mayor parte de las bandas del Thematic Mapper. Aquí son predominantes los efectos producidos por la intrusión del granito, por lo que no se toman en cuenta.

La separación en las reflectancias reflejadas por las imágenes Thematic Mapper en el interior y exterior de la franja es comparativamente mayor en las áreas sobre pizarras mosqueadas que

en las rocas alejadas del granito. La desviación estándar de ambas poblaciones cumple relaciones inversas, por lo que habría que esperar una mayor dispersión de valores en las zonas alejadas del granito, de acuerdo con parámetros estadísticos.

Ello conduce a la conclusión de que la reducción en reflectancia global demostrada por suelos en medidas de laboratorio por efecto de metamorfismo dinámico débil, se ve mejor reflejada en áreas en que la deformación que produce se superpone a efectos de un metamorfismo térmico

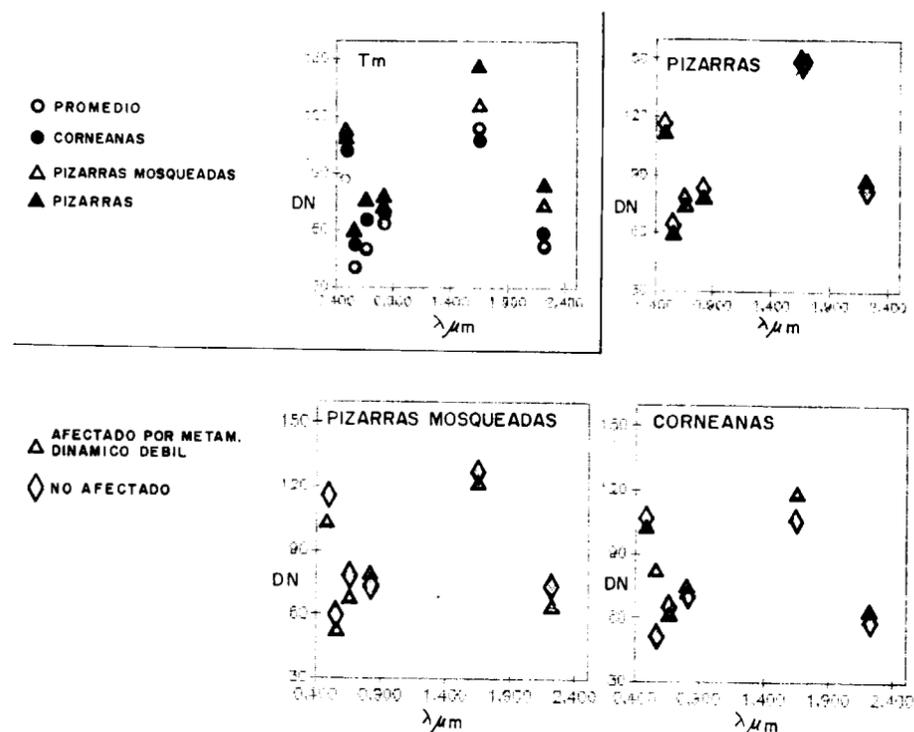


Figura 42.—Valores de números digitales calculados en imágenes Thematic Mapper en regiones afectadas por metamorfismo térmico y dinámico con distinta intensidad.

asimismo débil, con ventaja respecto a las áreas no afectadas por metamorfismo térmico.

Los cocientes de bandas 2/7 y 3/7 recogen siempre valores inferiores para las áreas internas de la franja (fig. 43). Los números digitales en el interior de la franja se separan de los valores medios para el conjunto de todos los campos de ensayo calculados que los correspondientes al exterior de la misma, abundando sobre la particularidad espectral del interior de la franja respecto al resto del área cubierta por la imagen.

#### TRATAMIENTO DIGITAL EN EL COMPLEJO ESQUISTO-GRAUVAQUICO CON IMAGENES THEMATIC MAPPER. REFLECTANCIA RELACIONADA CON EL METAMORFISMO TERMICO Y DINAMICO

##### Geomorfología y uso de suelo. Expresión visual en las imágenes iniciales

El Complejo esquistograuváquico se caracteriza

morfológicamente por desarrollar amplias llanuras de relieve suave. Su carácter deprimido les hace receptoras de coluviones, que cubren ampliamente la superficie, especialmente en las cercanías del contacto con la psammita ordovícica, que proporciona fuertes relieves acompañados de una alteración rojiza muy bien desarrollada (MARTIN SERRANO, 1986).

En el área de estudio, el área topográficamente deprimida está limitada al sur por el granito de Nisa-Alburquerque, que muestra un relieve elevado, y al norte por las crestas de la psammita de edad ordovícica en posición vertical que se le superpone estratigráficamente.

La red hidrográfica discurre en amplios valles cuya dirección está suavemente controlada por la fracturación y la dirección de las estructuras hercínicas principales.

Los desniveles mayores, del orden de 100 m., y el mayor encajamiento de los ríos, se producen al norte de la unidad de Alcántara (fig. 44). El CEG muestra una pendiente relativamente más

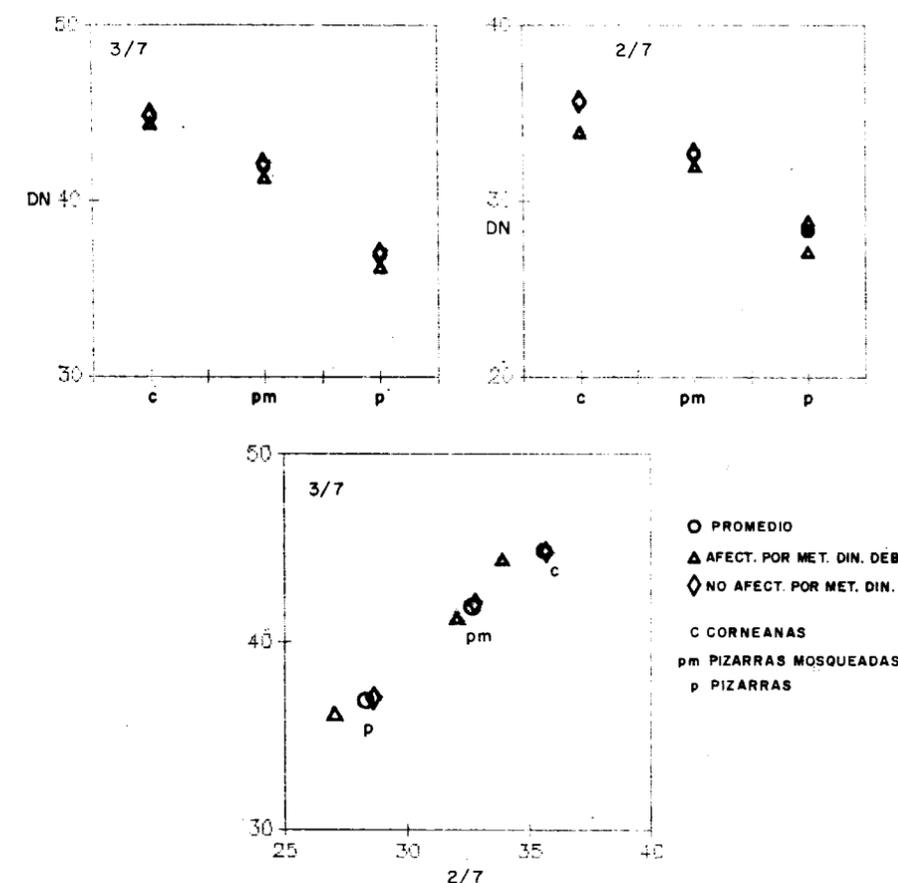


Figura 43.—Valores de cocientes 2/7 y 3/7 calculados en imágenes Thematic Mapper en áreas afectadas por metamorfismo térmico de distinta intensidad.

acentuada desde el contacto meridional con el granito, hasta el río Alburrel al norte, que discurre más o menos paralelo y cercano al contacto septentrional del CEG con la psammita ordovícica.

Las formas son más redondeadas y planas en el resto del área de estudio, con una altura media de 300 m.

Los drenajes principales, el río Alburrel y el río Albarragena, discurren paralelamente a las estructuras mayores en dirección NO-SE, con afluentes que siguen aproximadamente la dirección N-S. Los afluentes drenan hacia el norte, como se ha señalado, en la zona al norte de la unidad de Alcántara, mientras que lo hacen al sur en la región que se sitúa al norte de la unidad de Alburquerque.

El río Zapatón se sitúa en dirección N-S paralelo al contacto oriental del granito en la unidad de Alburquerque, y sus largos afluentes, perpendiculares al mismo, cuyas aguas proceden del este, siguen asimismo la dirección regional de las estructuras en ese área.

El uso de suelo influye en el comportamiento espectral de la superficie, por lo que se procedió a un estudio detallado de la extensión y estado de crecimiento de cosechas en las parcelas cultivadas, así como de la topografía, utilizando como base el cociente entre las bandas 4 y 3, además de observaciones directas (lám. 8).

Pueden distinguirse tres áreas en función del uso de suelo. Entre Valencia de Alcántara y San Vicente de Alcántara, aparece una pendiente suave con desarrollo de campos activamente

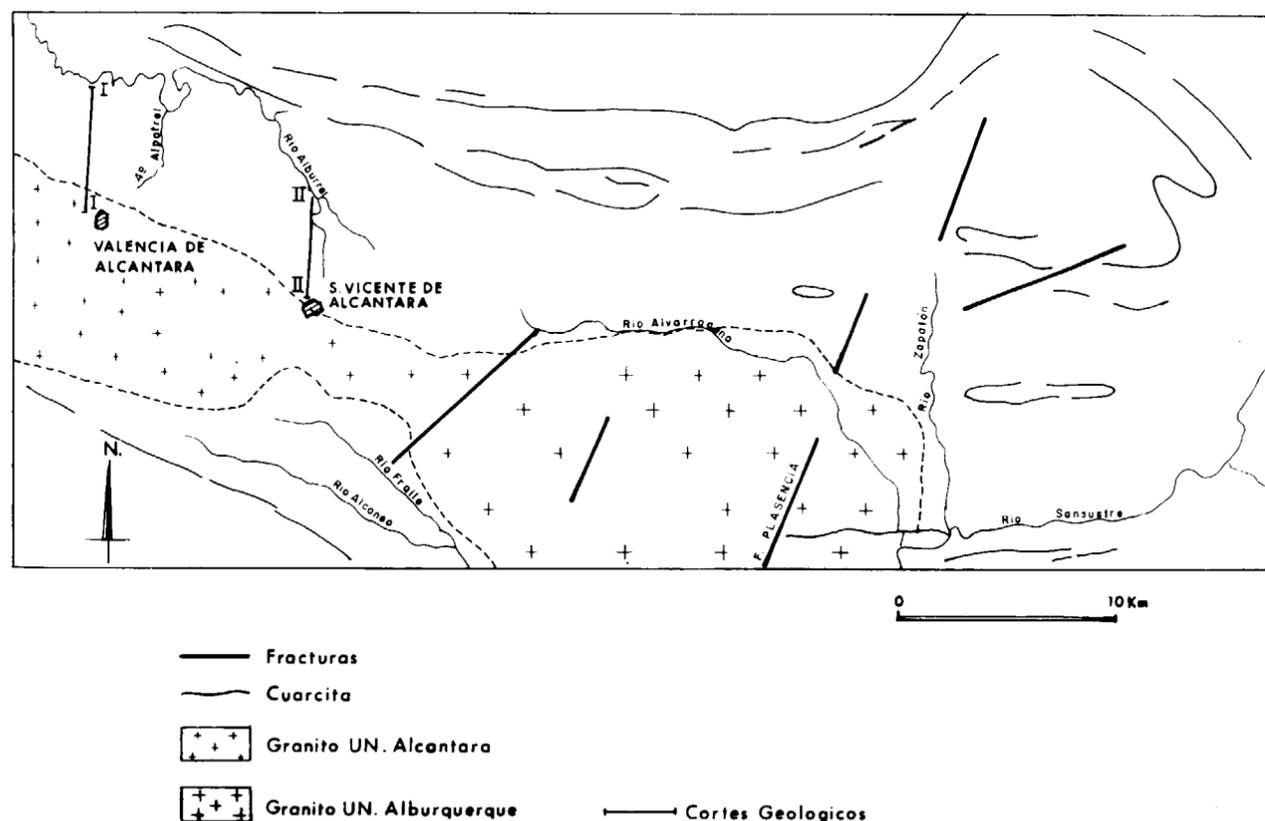


Figura 44.—Elementos geológicos y geográficos de referencia identificables en imágenes en el área de estudio.

cultivados, cuyo tamaño aumenta proporcionalmente a la distancia con el contacto con el granito hasta el río Alburjel. Los cultivos desaparecen al norte del río, donde los matorrales han invadido las parcelas en otro tiempo labradas.

A la altura de San Vicente de Alcántara, y coincidiendo aproximadamente con el estrangulamiento del granito, los campos cultivados aumentan de tamaño, desaparecen los pequeños huertos de olivos, y toda la superficie está desprovista de vegetación, con excepción de los cultivos.

Al este del estrangulamiento empiezan a proliferar las encinas y jaras, que llegan a ser bastante densas, en fincas dedicadas exclusivamente a la ganadería, y en algunos casos, a la caza. La región oriental ofrece por ello mayores dificultades de interpretación espectral en términos geológicos.

La presencia de vegetación en la superficie se evalúa en imágenes por medio de diversos índices. Uno de los más utilizados es el cociente entre el rojo y el infrarrojo cercano (ELVIDGE y LYON, 1985), que aprovecha la alta reflectancia de las hojas verdes en el infrarrojo cercano, y la absorción producida por la clorofila en el rojo (KNIPLING, 1970). En el Thematic Mapper las longitudes de onda en el rojo corresponden a la banda 3, y el infrarrojo cercano a la banda 4.

El cociente 4/3 refleja en tres sectores las diferencias en vegetación descritas anteriormente (lám. 18). Toda la franja entre Valencia de Alcántara y San Vicente de Alcántara despliega los valores más bajos, indicando un recubrimiento vegetal uniformemente escaso. A la altura del estrangulamiento aparece una región de valores intermedios, mientras que al este se intercalan manchas de valores altos y bajos más o menos

irregularmente, en función de la densidad de encinas y jaras.

Un primer examen visual de las seis bandas utilizadas, desaconsejó el uso de las tres bandas del visible para tratar de diferenciar cualquier rasgo geológico en el interior del Complejo esquisto-grauváquico, por su aspecto confuso. Aun así, la banda 3 muestra una buena expresión de la topografía, así como la 7, por lo que se seleccionaron para estudio de lineamientos.

La banda 4 individualiza el Complejo esquisto-grauváquico del resto de los conjuntos litológicos, pero expresa pocos contactos tonales en el interior del mismo. Son las bandas 5 y 7 las que recogen mayores irregularidades tonales dentro del CEG.

#### Evaluación estadística inicial de las imágenes Thematic Mapper

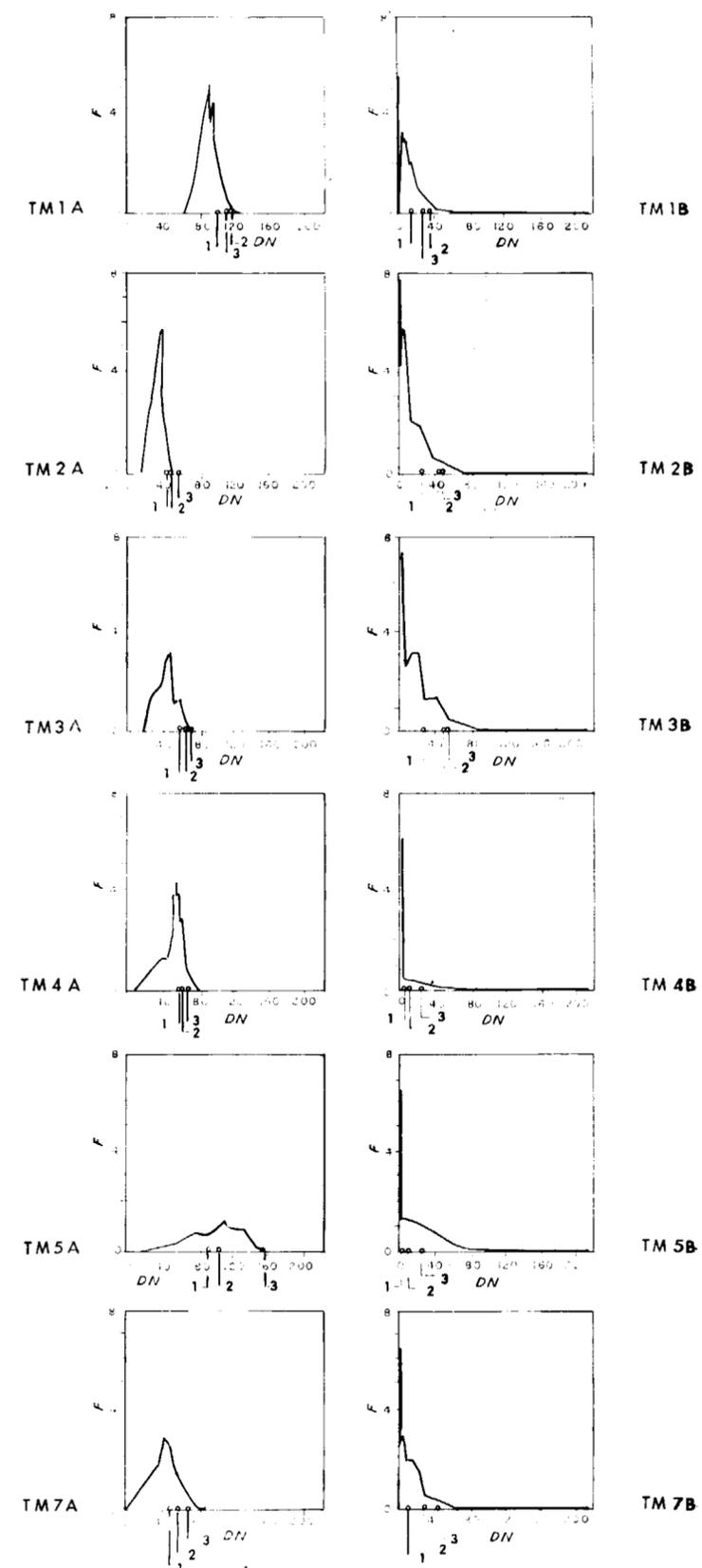
Los histogramas de las seis bandas del Thematic Mapper utilizadas, presentan distribuciones habitualmente estrechas, con desviaciones típicas próximas a 20, y tendencia a situarse en valores bajos de reflectancia, con valores medios alrededor de 50 (fig. 45, tabla 1).

La banda 1, situada sobre el azul del visible, registra valores más altos que el resto, por efecto de la dispersión de energía electromagnética producida por las partículas de la atmósfera.

La banda 5 se sale de esta norma de modo habitual, produciendo un histograma muy ancho, y recogiendo reflectancias excepcionalmente altas (media de números digitales superior a 100).

El análisis de correlación (tab. 1) atribuye a la banda 4 los índices más bajos, en relación con las bandas 5 y 7 en primer lugar, y la 3 en segundo. Sin embargo, puesto que la banda 4 está

Figura 45.—Histogramas de frecuencias de números digitales en bandas Thematic Mapper correspondientes al visible y al infrarrojo cercano sin modificar (A), y sus correspondientes en bandas con estiramiento (B) enfocado al Complejo esquisto-grauváquico (1, intensamente metamorfizado; 2, débilmente metamorfizado; 3, no metamorfizado).



**TABLA 1**  
**Matriz de correlación en bandas Thematic Mapper no modificadas correspondientes al visible y al infrarrojo cercano**

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM 5	TM7
TM1 ... ..	1					
TM2 ... ..	0.97	1				
TM3 ... ..	0.90	0.97	1			
TM4 ... ..	0.88	0.87	0.81	1		
TM5 ... ..	0.88	0.91	0.93	0.78	1	
TM7 ... ..	0.86	0.91	0.93	0.71	0.96	1
EV ... ..	5.43	0.35	0.11	0.08	0.03	0.00
Media ... ..	86.42	40.59	50.38	64.89	114.30	51.71
D. Típica ... ..	22.33	12.16	18.26	18.53	39.76	19.89
Cov. ... ..	0.26	0.30	0.36	0.29	0.35	0.38
Mín. ... ..	0	0	0	0	0	0
Máx. ... ..	217	118	156	152	255	181

fuertemente influida por la intensidad del recubrimiento vegetal, es conveniente considerar el siguiente orden de índices de correlación, que relacionan la banda 1 con la 5 y la 7 de nuevo, así como la 3.

Por ello se seleccionaron las bandas 3, 5 y 7 (SHEFFIELD, 1985) para una composición en falso color, y de modo secundario, las 5, 3 y 2, a las que pueden añadirse la 5, 7 y 4.

#### Individualización espectral del complejo esquisto grauváquico

Todas las bandas fueron sujetas a una cuidadosa segmentación de valores para evaluar una posible preferencia del Complejo esquisto-grauváquico a mostrar rangos de reflectancia distintivos. De este modo pudieron agruparse las grandes unidades geológicas en tres intervalos de reflectancia, que se repiten con mayor o menor nitidez en todas las bandas (fig. 46).

El intervalo inferior se sitúa sobre el Paleozoico, que por el mayor contraste de competencia entre sus formaciones estratigráficas, despliega un relieve irregular con crestas y valles, abundancia de vegetación en crestas y laderas, y sombras (lám. 9).

El sector occidental del granito de Nisa-Albur-

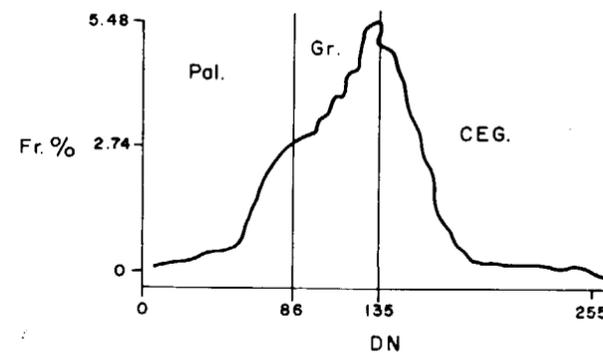


Figura 46.—Distribución de rangos de números digitales para distintas unidades geológicas en el histograma de frecuencias de números digitales de la banda 7 del Thematic Mapper.

querque, más cubierto de musgo y líquenes, proporciona reflectancias en rangos intermedios en todas las bandas. El sector oriental se reúne con el Complejo esquisto-grauváquico en el rango de valores de reflectancia superiores.

De este modo se seleccionaron umbrales para producir un estiramiento en sectores al objeto de realzar la variabilidad espectral en el Complejo esquisto-grauváquico.

Cada una de las bandas del visible y del infra-

rojo cercano se sometieron a un estiramiento en dos sectores, tomando como referencia los umbrales revelados por la segmentación de valores de las bandas no modificadas (fig. 45). El sector de valores inferiores adopta un coeficiente de expansión mínimo, que les convierte en ceros en las imágenes estiradas.

El resto de los valores primitivos se expande reproduciendo la mitad de una curva en una campana muy plana. Las colas de la campana, con frecuencias inferiores al 3 por 100, comienzan en todas las bandas en números digitales del orden de 40, y se extienden hasta el extremo de 255. Solamente la banda 7 presenta una distribución más estrecha, en la que los números digitales que aparecen con una frecuencia significativa se reducen a valores de 190.

Como consecuencia de la elevada frecuencia con que aparecen los ceros, los parámetros estadísticos no son representativos de la distribución de los valores significativos en cuanto a la reflectancia del Complejo esquisto-grauváquico se refiere, por lo que no se tomarán en cuenta en ninguno de los tratamientos posteriores.

Visualmente, las imágenes estiradas están fuertemente contrastadas respecto a las iniciales, con amplias áreas oscuras sobre el Paleozoico y la unidad de Alcántara del granito.

#### Examen visual de composiciones de color de componentes principales

Las seis imágenes producto del análisis de componentes principales calculado sobre las seis bandas del Thematic Mapper en el visible y el infrarrojo cercano sirven como indicadores de las posibles unidades o fenómenos con significado geológico identificables en las imágenes. Puesto que se trata de un tratamiento meramente estadístico de la información numérica en relación a su frecuencia de aparición, no permite identificar materiales en base a sus propiedades espectrales, pero sí diferenciar unos de otros (RIAZA y BEL-LAN, 1986).

De este modo, una composición en color con las tres primeras componentes, que acumulan la mayor parte de la información (lám. 10) nos muestra una gran variedad de colores con formas geo-

métricas en el CEG, que están fundamentalmente provocados por el uso de suelo. En esta combinación, se ha asignado color azul a la componente 3, rojo a la primera y verde a la segunda.

La comparación con la segmentación en el cociente 4/3 (lám. 8) indica que las parcelas en las que en ese momento crecían cosechas aparecen en color rojo, y las parcelas que habían sido recientemente aradas para ser sembradas al año siguiente, aparecen con tonos amarillos y anaranjados. De esto se deduce que la primera componente principal (rojo) recoge en el CEG áreas con mayor densidad y vigor de vegetación, y que su disminución se refleja en una mayor participación de la segunda componente principal, produciendo colores amarillos. Los drenajes y zonas muy densamente vegetadas aparecen en morado, que indica una participación más seria de la tercera componente principal, en azul, por lo que la influencia de vegetación no parece estar únicamente asociada a los valores representados con mayor frecuencia, sino a criterios adicionales.

La composición en color de las tres componentes principales de menor orden, 4, 6, 5 (azul, rojo y verde), sólo muestra diferencias en las parcelas de mayor tamaño en CEG. Las parcelas recién aradas aparecen en verde, que es el color asignado a la sexta componente principal. Esta componente podría utilizarse para elaborar una máscara que individualizara las zonas que presentan menor influencia espectral de la vegetación.

La buena identificación de parcelas recién aradas en la componente principal de sexto orden calculada sobre las seis bandas del TM nos adelanta diferencias estadísticas insignificantes en las posibles variaciones litológicas en el seno del CEG.

Ya que el análisis de correlación aconsejó el uso de las bandas 3, 5 y 7, se calcularon componentes principales sobre estas tres bandas, y se examinaron componiéndolas como 2 (azul), 1 (rojo) y 3 (verde) (lám. 11). Las diferencias en uso de suelo siguen destacando sobre cualquier otro rasgo, pero se aprecia una alternancia en el predominio de tonos en cuatro bandas diferentes al norte del contacto del granito de la unidad de Alcántara paralelas al mismo, y una interrupción en esas bandas a lo largo de una franja amplia

que se dispone en dirección NE-SO pasando por el estrangulamiento en el granito a la altura de San Vicente de Alcántara.

Para aquilatar más la diferenciación de áreas en el CEG, se calcularon componentes principales sobre las seis bandas estiradas en sus intervalos de reflectancia más altos. Manteniendo al margen las componentes principales de orden más alto, se confecciona una composición de color con las 4, 3 y 5 (ARV) (lám. 12). Aquí las diferencias en uso de suelo se difuminan para dar paso a la diferenciación de áreas paralelas al contacto, indicadas por el predominio de tonos magenta alrededor del contacto con el granito, bordeadas en su exterior por cinturones azul oscuro y negros. Los verdes y marrones (componentes 5 y 3) sólo predominan sobre la unidad de Alcántara del granito y el Paleozoico, que son las áreas uniformizadas, y por lo tanto, no significativas, en las imágenes estiradas que se examinan. También aparecen en la franja del estrangulamiento en el granito.

#### Examen visual de composiciones en falso color con imágenes Thematic Mapper sin modificar y estiradas

Después de haber estudiado las composiciones en color de componentes principales, y teniendo una orientación sobre las áreas geográficas que muestran diferencias espectrales, se procede al examen de composiciones en color de bandas que no han sido modificadas, para evaluar la contribución relativa de cada una de estas bandas en las zonas indicadas, y una primera aproximación a su significado espectral en términos de composición mineralógica.

La composición en falso color recomendada por el análisis de correlación con las bandas 5, 3 y 7 en azul, rojo y verde, respectivamente (lámina 13), presenta una evolución de tonos de anaranjados a amarillos y blancos en las zonas circundantes al granito, a distancias progresivamente más alejadas de él, teniendo en cuenta solamente las parcelas recién aradas. La banda 3 contribuye fuertemente en las zonas inmediatas al contacto, y su influencia disminuye en favor de la banda 7 al alejarse de él, para finalizar en una contribución similar de las tres bandas.

El Falso Color 574 (ARV) sustituye la banda 3 por la banda 4 en la combinación anterior. La expresión topográfica es mejor, al contribuir en mayor medida la vegetación. Los rojos y naranjas evolucionan a amarillos, lo que indica un predominio inicial de la banda 7 que disminuye cediendo el lugar a la 4 en zonas alejadas del contacto con el granito. Este cambio es mucho más difuso que en el FC 537. A pesar de que la banda 4 proporciona índices de correlación muy bajos con las otras dos bandas en la totalidad de la escena, las diferencias son mucho menores cuando se trata de áreas desprovistas de vegetación como las que nos ocupan. Por ello, los cambios de color son menos acusados.

Para tener alguna muestra de la influencia del visible, se compuso un falso color 352 (ARV). Las parcelas recién aradas aparecen en azul, cuya intensidad disminuye al alejarse del contacto con el granito, indicando un predominio absoluto de la banda 3 sobre la 5 y la 2.

En las tres composiciones de falso color examinadas, la banda transversal al granito en el estrangulamiento del mismo se dibuja con claridad en tonos oscuros, sin que parezca predominar ninguna de las bandas contribuyentes a las composiciones de color.

La banda 3 del Thematic Mapper, que coincide con las longitudes de onda correspondientes al rojo en el visible, parece tener una influencia mayor en las regiones cercanas al contacto con el granito, que se mitiga paralelamente al aumento de la preponderancia de la banda 7.

#### Análisis estadístico de bandas iniciales en relación con distintos tipos de metamorfismo

Se han calculado estadísticas en las áreas cubiertas por las parcelas cultivadas que estaban recién aradas en el momento de registrarse la imagen, tanto en las bandas individuales no modificadas como en las sometidas a estiramientos sectoriales, tomando como referencia la diversidad de colores revelada por la composición en falso color con las bandas 5, 3 y 7 (ARV).

Las reflectancias medias calculadas para todo el área de estudio son comparativamente más uniformes en valores absolutos en las imágenes estiradas, como consecuencia de la alta frecuencia de ceros producida por el estiramiento.

Para obtener una impresión más ajustada de la estimación de reflectancia observada por medio de un radiómetro de campo o de laboratorio, se ha tratado de eliminar el desfase impuesto por la distinta reflectancia global de cada una de las bandas motivada por el sensor. Para ello se han sustraído los valores medios de reflectancia de cada banda a los valores correspondientes a cada uno de los grupos distinguidos en función de la distancia al contacto con el granito (fig. 47).

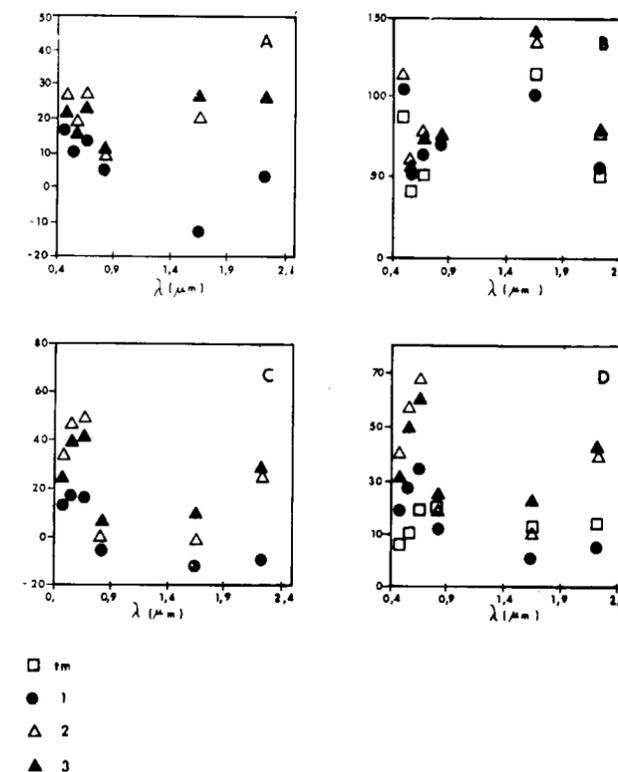


Figura 47.—Diagramas de números digitales en las bandas Thematic Mapper iniciales (A) y estiradas (C), y sus valores correspondientes al sustraer los valores promedios por banda (B y D) para las tres áreas afectadas por metamorfismo térmico con distinta intensidad (1, intensamente metamorfizado; 2, débilmente metamorfizado; 3, no metamorfizado; tm, valor promedio de la banda Thematic Mapper correspondiente).

Los tres grupos de campos seleccionados a distancias progresivamente más alejadas del granito, que reflejan una influencia progresivamente más débil del metamorfismo térmico producido por la intrusión del mismo, exhiben valores relativos de reflectancia muy similares en las bandas sin modificar y las estiradas (fig. 47). Las

parcelas sobre áreas más intensamente metamorfizadas deben presentar valores relativamente más bajos en reflectancia que las menos afectadas por el metamorfismo térmico (ROWAN et al., 1987; ANTON-PACHECO, 1989).

Sin embargo, se da una inversión en las reflectancias globales de los dos grupos más alejados del contacto en el visible y el infrarrojo (fig. 47). El segundo grupo muestra reflectancias más altas que el tercero en el visible, mientras que la relación se invierte en el infrarrojo. También se aprecia una intensificación en la depresión de reflectancia global de los campos más próximos al granito en la banda 5 respecto a los valores medios calculados para todo el área de estudio, depresión que se extiende a las bandas 4 y 7 en las bandas estiradas.

Estas aparentes contradicciones pueden estar motivadas por la ausencia de calibrado de las imágenes utilizadas, al no disponerse de un área de control cuya variabilidad estacional y anual en humedad y estado de crecimiento de la vegetación se conociera con suficiente precisión.

El examen visual de composiciones en falso color con las bandas sin modificar y las estiradas concede una mayor importancia a las bandas 3 y 7 que a la 5 en la diversificación de respuestas atribuibles a la influencia de la intrusión del granito. Las bandas 3 y 7 exhiben valores absolutos parecidos de reflectancia en las imágenes sin modificar, y es la banda 5 la que muestra una distancia comparativamente mayor en las áreas intensamente metamorfizadas respecto a las menos afectadas por el metamorfismo térmico. Esta distancia se corrige en la banda 5 estirada, ya que el estiramiento sectorial uniformiza las desviaciones típicas en las distribuciones finales de valores.

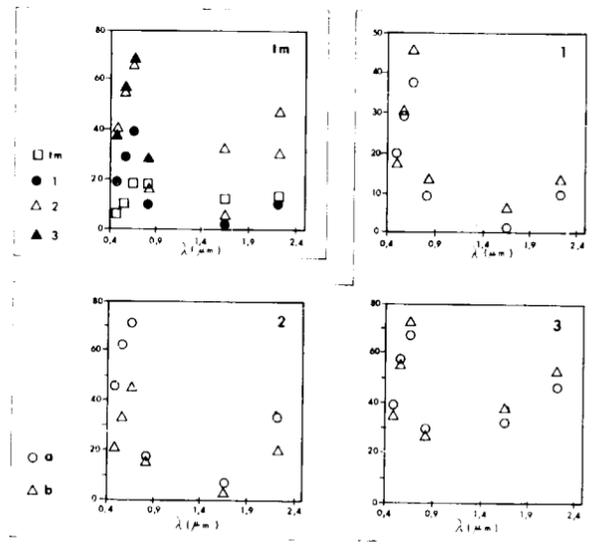
La presentación de datos en el monitor se realiza por medio de una función de estiramiento automática que modifica la estadística de los datos numéricos correspondientes, y cuyos resultados finales no son controlables interactivamente por el operador. Por ello, los colores finales de presentación de datos han de utilizarse con cautela. A estas cautelas hay que añadir las modificaciones de tonos introducidas por la limitación de colores impuesta por el diseño físico del monitor de presentación, y por el proceso fotográfico convencional de obtención de copias

en papel y transparencias. Por no dejar de mencionar la distinta apreciación visual de colores inmersos en fondos de tonos diferentes (DRURY, 1987).

En cuanto a la influencia del metamorfismo dinámico, no cabe sino repetir las observaciones reseñadas en el estudio de propiedades espec-

trales en relación con la fábrica interna de las rocas, en donde se señala una tendencia a reflectancias más bajas en las zonas más intensamente deformadas. Las bandas estiradas (figura 48) reproducen la misma distribución de valores que las no modificadas, en lo que a estas áreas se refiere

**BANDAS ESTIRADAS**



**BANDAS NO MODIFICADAS**

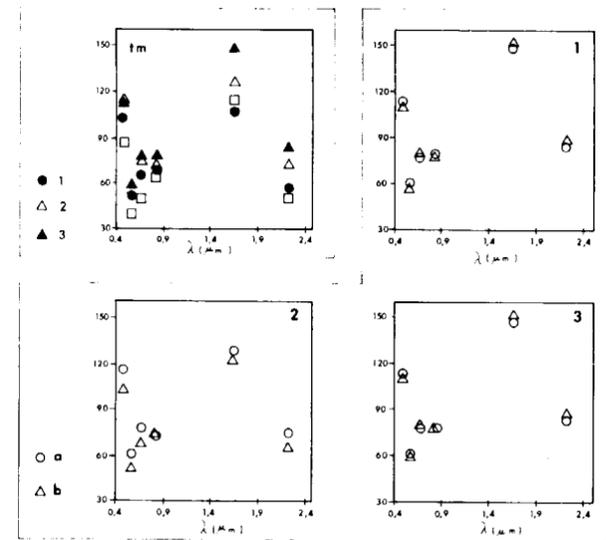


Figura 48.—Diagramas de números digitales en bandas TM iniciales y estiradas para áreas afectadas (b) o no (a) por metamorfismo dinámico débil, en zonas con distinta intensidad de metamorfismo térmico (tm, valores promedio para la banda Thematic Mapper para distintas intensidades de metamorfismo térmico. 1, metamorfismo térmico intenso; 2, metamorfismo térmico débil; 3, no afectadas por metamorfismo térmico).

**Evaluación estadística y visual de cocientes de bandas**

El cálculo de cocientes entre bandas es una técnica muy conocida enfocada a la exageración de diferencias espectrales sutiles entre dos series de datos distintas. Presenta la ventaja respecto al análisis de componentes principales de relacionarse con respuestas espectrales definidas, y ofrecer la capacidad, por lo tanto, de identificar distintos materiales, en función de las mismas (PROST, 1980; CROWLEY et al., 1989).

Así, se han calculado cocientes en bandas sin modificar y estiradas, y ambos se han enmascarado para minimizar la respuesta de la vegeta-

ción con valores altos tomados del cociente 4/3 calculado sobre bandas sin modificar. Las bandas a dividir se han seleccionado entre aquellas con bajos índices de correlación, aquellas que visualmente ofrecían mayor variedad espectral, y varios cocientes repetidamente utilizados en la literatura para la cartografía de distintos tipos de materiales.

Visualmente, son los cocientes 5/4 y 3/1, empleados habitualmente para cartografiar abundancia de alteraciones ferruginosas (ROWAN et al., 1976; PODWYSOCKI et al., 1983; ROWAN et al., 1987; KAUFMANN, 1987) los que dibujan mejor las diferentes regiones alrededor del granito. La franja que atraviesa transversalmente el

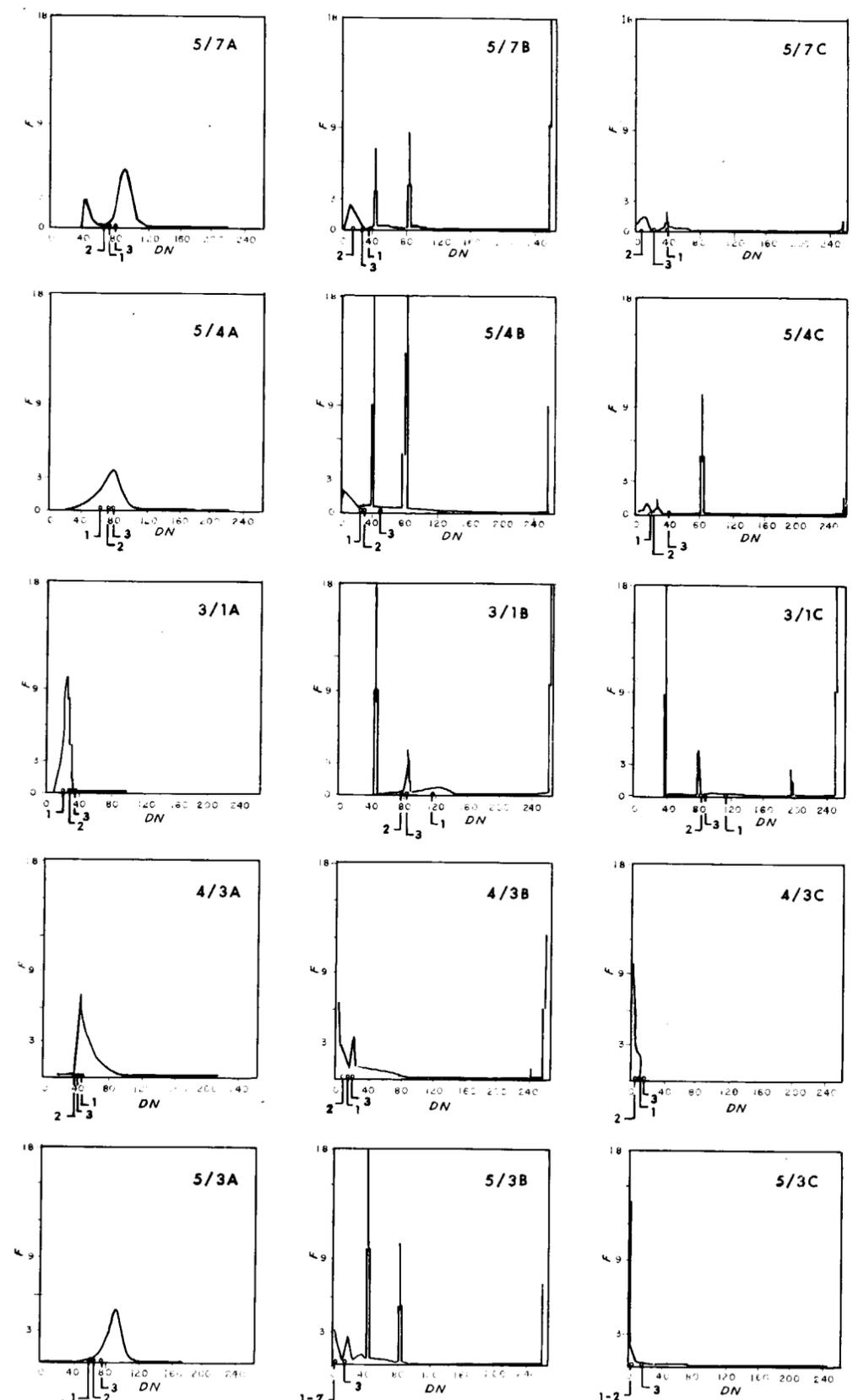


Fig. 49 A

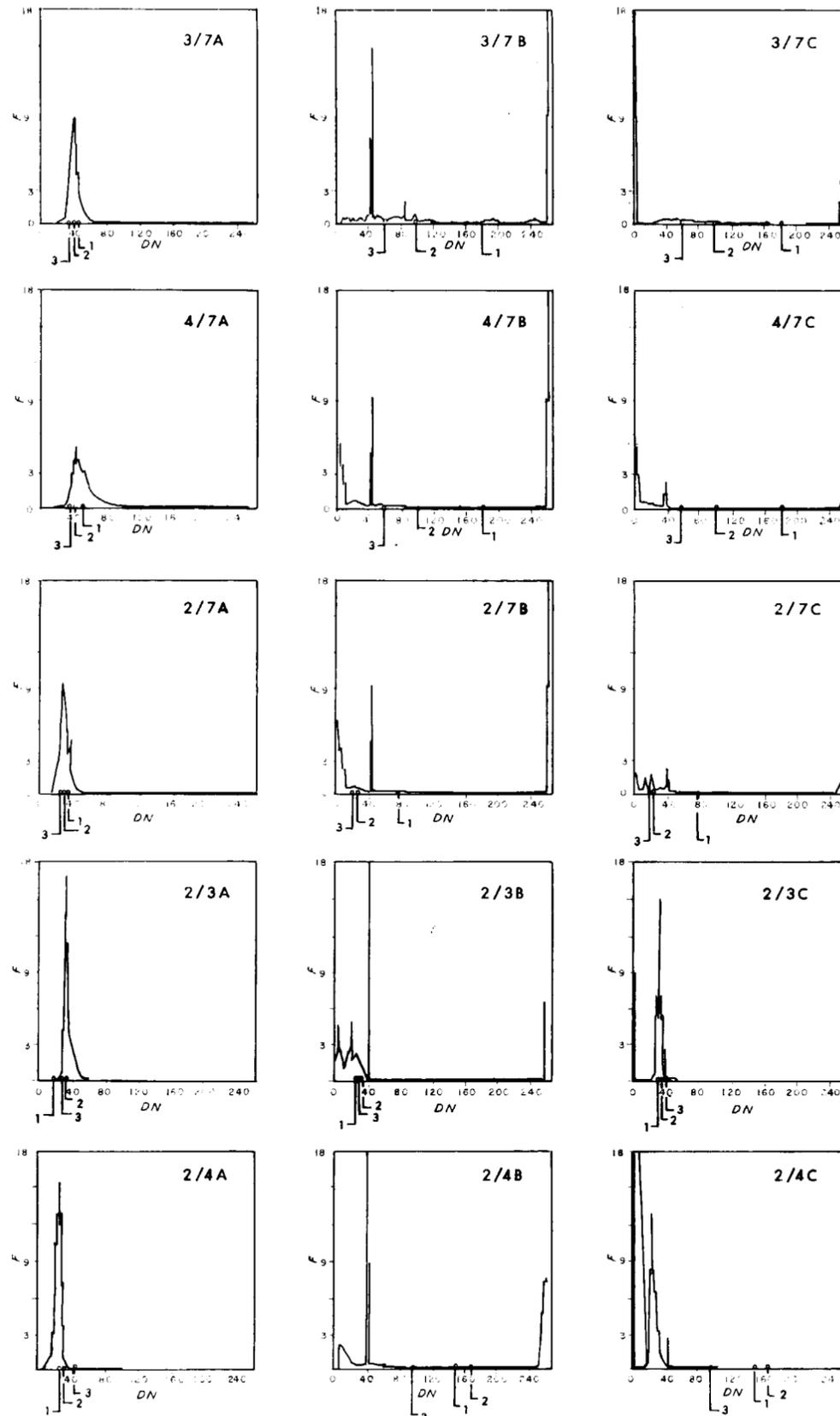


Fig. 49 B

Figuras 49A y 49B.—Histogramas de cocientes calculados sobre bandas TM iniciales, cocientes calculados sobre bandas estiradas, y cocientes calculados sobre bandas estiradas enmascarados para zonas con alta densidad de vegetación (1, intensamente metamorfizado; 2, débilmente metamorfizado; 3, no metamorfizado).

cuerpo granítico en su zona de estrangulamiento se visualiza mejor en los 5/7, 4/3 y 3/1.

Comparando los histogramas de los cocientes con sus correspondientes enmascarados, casi todos muestran en gran medida la influencia de la vegetación (fig. 49). Son los 5/4, 3/1 y 3/7 los que parecen sustraerse de alguna manera a una representación espectral predominante del recubrimiento vegetal.

Las desviaciones típicas pequeñas de las bandas 2 y 3 producen cocientes con desviaciones

típicas igualmente pequeñas cuando estas bandas son numeradores.

El análisis de componentes principales realizado sobre los cocientes calculados indica una correlación menor entre los 5/4, 3/1 y 2/4 (tabla 2).

**Análisis de reflectancia en cocientes de bandas en relación con distintos tipos de metamorfismo**

Teniendo en cuenta las consideraciones del apartado anterior, se examinaron composiciones de

**TABLA 2**  
Matriz de correlación en cocientes alculados sobre bandas TM iniciales

	5/7	5/4	3/1	4/3	5/3	3/7	4/7	2/7	2/3	2/4
5/7	1									
5/4	-0.29	1								
3/1	-0.48	0.25	1							
4/3	0.52	-0.40	-0.47	1						
5/3	0.40	0.07	-0.06	0.62	1					
3/7	0.65	-0.40	-0.39	0.09	-0.30	1				
4/7	0.87	-0.54	-0.49	0.59	0.27	0.72	1			
2/7	0.91	-0.43	-0.52	0.51	0.29	0.73	0.90	1		
2/3	0.44	-0.19	0.13	0.68	0.87	-0.17	0.40	0.46	1	
2/4	-0.31	0.54	—	-0.36	-0.15	-0.21	-0.42	-0.23	-0.10	1

color de cocientes de bandas, poniendo especial atención en aquellas que mostraran diferenciación en color en las áreas a distintas distancias del contacto con el granito, así como la franja transversal que pasa por el estrangulamiento del mismo.

Los cocientes 5/7 y 5/4 rivalizan en su influencia en las áreas circundantes al granito, predominando el 5/7 en las cercanías. El cociente 4/3, que debe de mostrar valores relativamente uniformes en las áreas desprovistas de vegetación, sirve de contrapunto neutral en esta combinación 4/3 5/7 5/4 (ARV) en que el descenso en la intensidad del metamorfismo térmico se refleja en la evolución desde el naranja al amarillo (lám. 14).

La misma relación se observa entre el 2/4 y el 3/1, provocando el paso del verde al amarillo, en la combinación 5/7 3/1 2/4 (ARV) (lám. 15).

El cociente 3/1 domina en azul oscuro las áreas más inmediatas al granito en la composición 3/1 5/3 4/7.

El 3/7 toma valores superiores a mayor proximidad con el granito en la composición 4/7, 3/7, 5/3 (lám. 16), y bajos por el contrario en la 3/7, 4/3, 5/4.

La composición 2/7, 4/7, 5/3 (lám. 17) cede el protagonismo al 2/7, cuyos valores son inversamente proporcionales a la distancia del granito.

De este modo, los cocientes 3/7, 2/7, 2/4, 3/1, 5/4 y 5/7 parecen expresar con más sensibilidad la variabilidad en el comportamiento espectral de las pelitas y grauvacas del Complejo esquisto-grauváquico en relación con el metamorfismo térmico producido por la intrusión de granitos.

La franja paralela a la Falla de Plasencia es visualizable en la mayor parte de las combinacio-

nes antes descritas, si bien la ausencia de un número suficiente de parcelas que pudieran ofrecer diferencias sutiles en el comportamiento espectral no permite establecer relaciones tan claras en la importancia relativa de cada uno de los cocientes contribuyentes a la composición de color. Puede reseñarse una expresión especial-

mente nítida en la composición 5/7 3/1 2/4 (ARV) (lám. 15).

El análisis de regresión aplicado a las estadísticas calculadas sobre las parcelas recién aradas en cocientes calculados sobre bandas sin modificar y estiradas, revela índices mejores en los 3/7, 2/7, 5/3, y secundariamente, 5/4 (fig. 50).

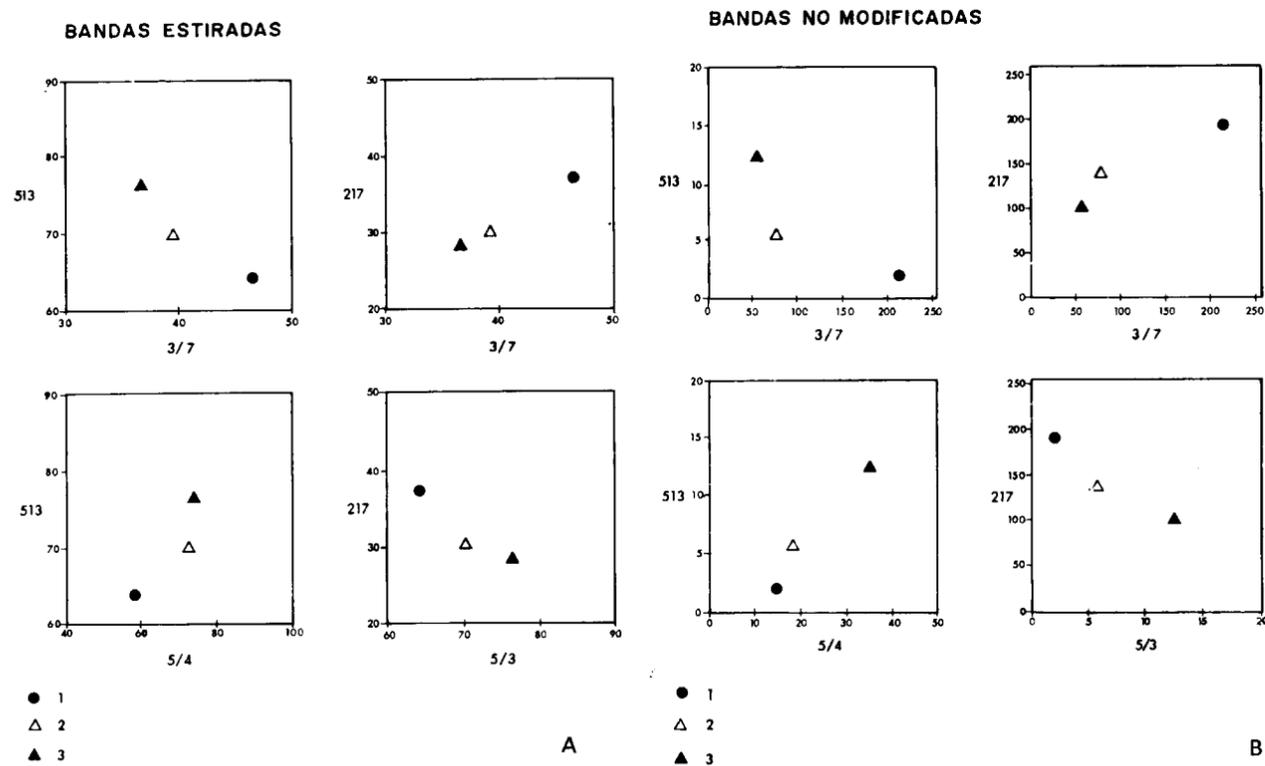


Figura 50.—Diagramas binarios de números digitales calculados sobre cocientes en bandas iniciales y estiradas para áreas afectadas por metamorfismo térmico con distinta intensidad (1, intensamente metamorizado; 2, débilmente metamorizado; 3, no metamorizado).

para las tres regiones espectralmente distintas en relación al metamorfismo térmico. Esto confirma las observaciones en composiciones de color realizadas visualmente.

Tanto el cociente 3/7 como el 2/7 presentan histogramas con una desviación típica muy pequeña, y, en principio, las bandas 2 y 3 ofrecerían posibilidades bajas de registrar variabilidad es-

pectral. Sin embargo, la mayor desviación típica de la banda 7 potencia la amplia distribución de los valores de reflectancia en las tres áreas en las bandas que actúan de numerador.

El cociente 5/3 disminuye de valor al alejarse del granito. Los valores de reflectancia para las tres áreas corresponden a frecuencias mayores en la banda 3 que en la banda 5, y su separación

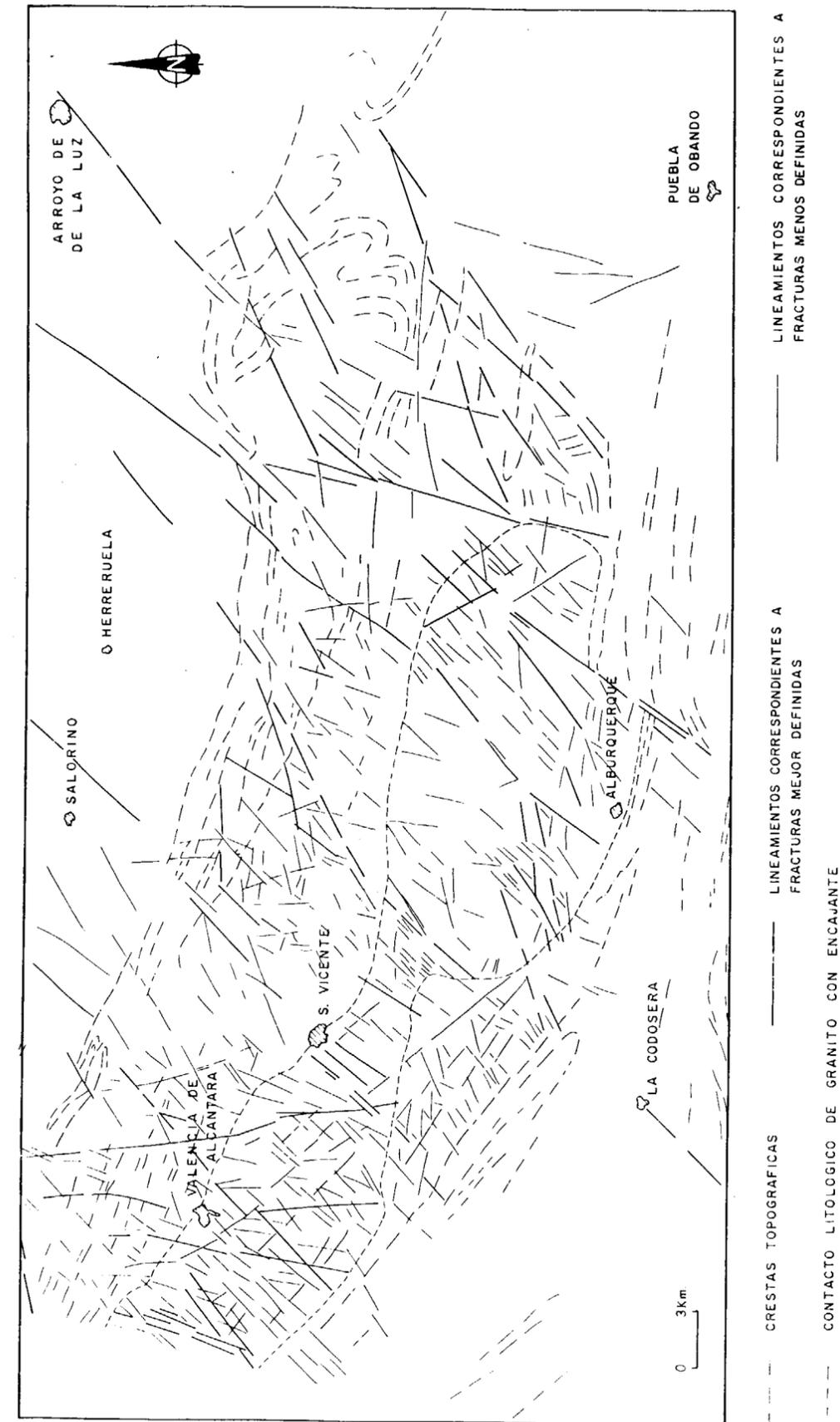


Figura 51.—Mapa de lineamientos.

nes antes descritas, si bien la ausencia de un número suficiente de parcelas que pudieran ofrecer diferencias sutiles en el comportamiento espectral no permite establecer relaciones tan claras en la importancia relativa de cada uno de los cocientes contribuyentes a la composición de color. Puede reseñarse una expresión especial-

mente nítida en la composición 5/7 3/1 2/4 (ARV) (lám. 15).

El análisis de regresión aplicado a las estadísticas calculadas sobre las parcelas recién aradas en cocientes calculados sobre bandas sin modificar y estiradas, revela índices mejores en los 3/7, 2/7, 5/3, y secundariamente, 5/4 (fig. 50).

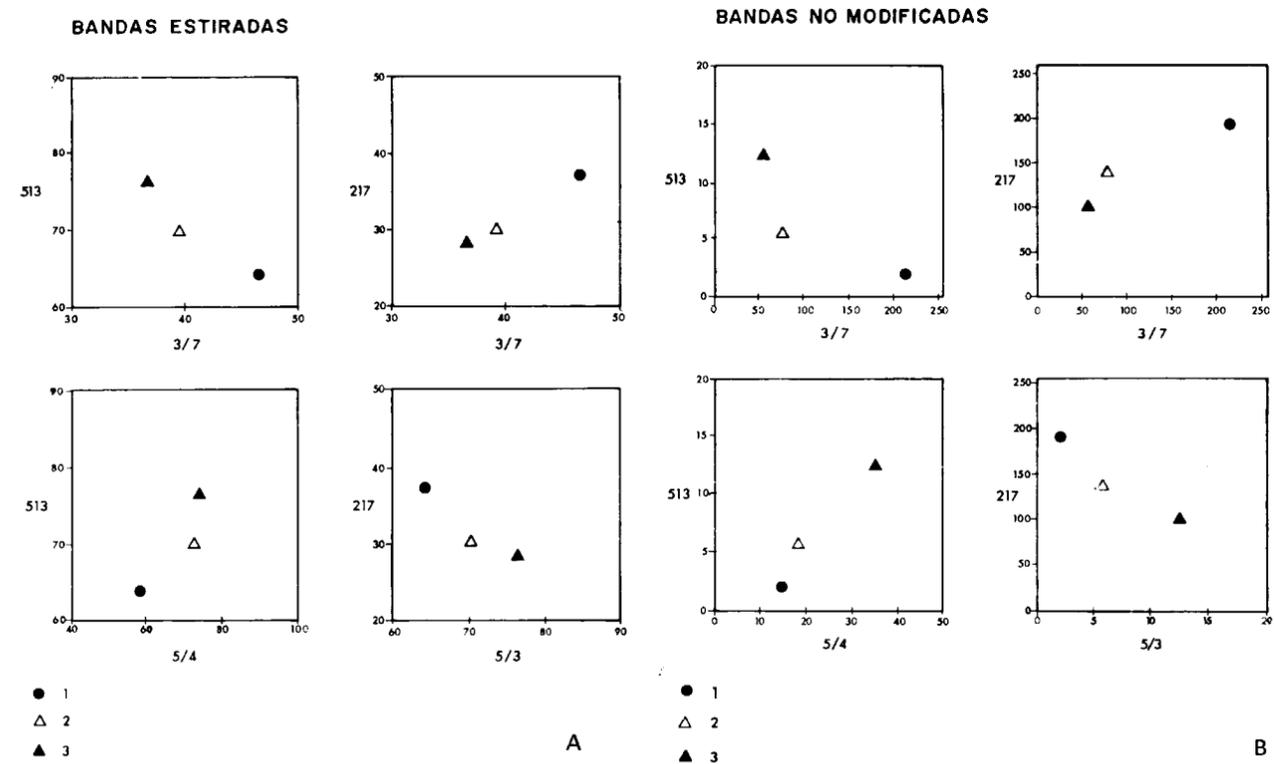


Figura 50.—Diagramas binarios de números digitales calculados sobre cocientes en bandas iniciales y estiradas para áreas afectadas por metamorfismo térmico con distinta intensidad (1, intensamente metamorfizado; 2, débilmente metamorfizado; 3, no metamorfizado).

para las tres regiones espectralmente distintas en relación al metamorfismo térmico. Esto confirma las observaciones en composiciones de color realizadas visualmente.

Tanto el cociente 3/7 como el 2/7 presentan histogramas con una desviación típica muy pequeña, y, en principio, las bandas 2 y 3 ofrecerían posibilidades bajas de registrar variabilidad es-

pectral. Sin embargo, la mayor desviación típica de la banda 7 potencia la amplia distribución de los valores de reflectancia en las tres áreas en las bandas que actúan de numerador.

El cociente 5/3 disminuye de valor al alejarse del granito. Los valores de reflectancia para las tres áreas corresponden a frecuencias mayores en la banda 3 que en la banda 5, y su separación

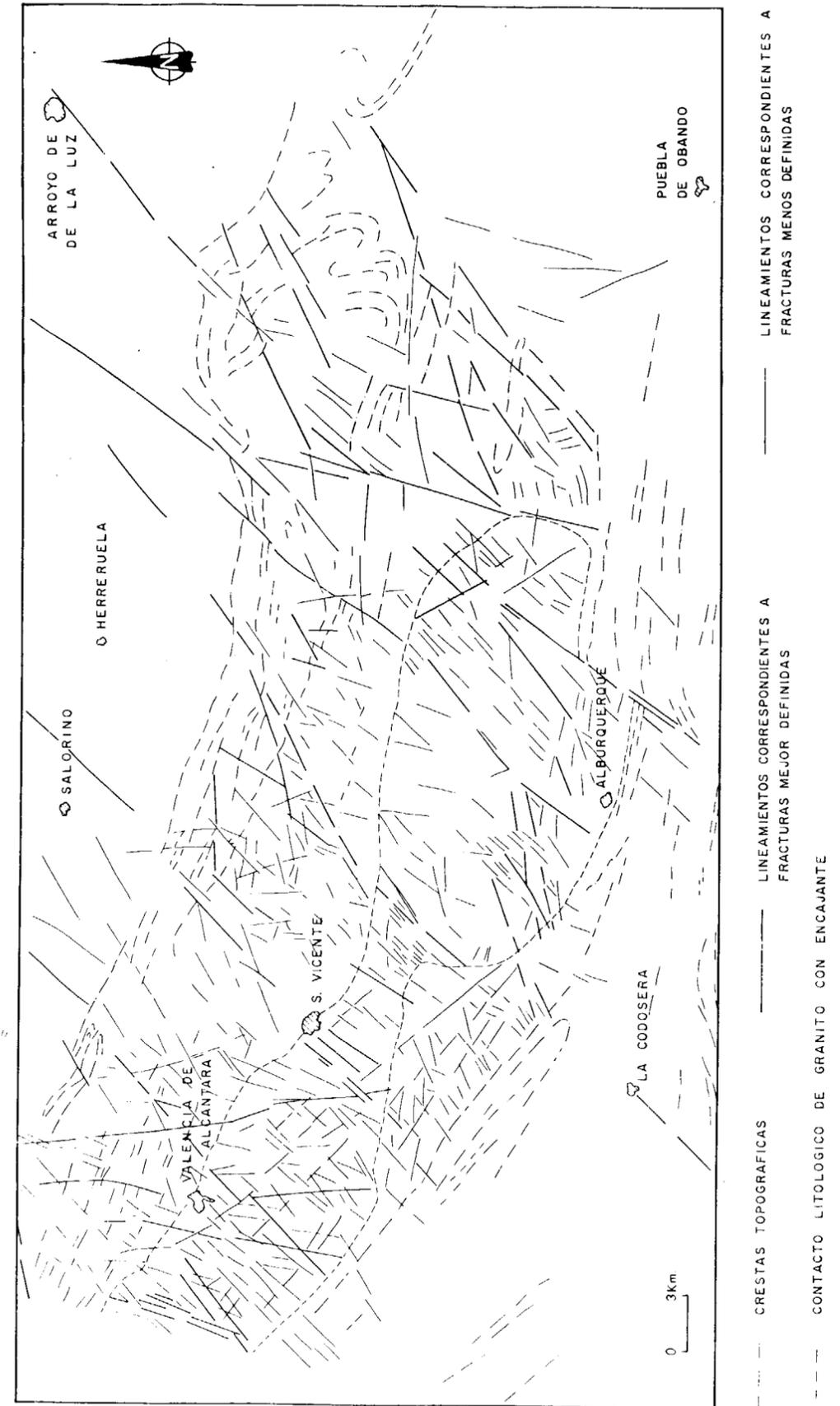
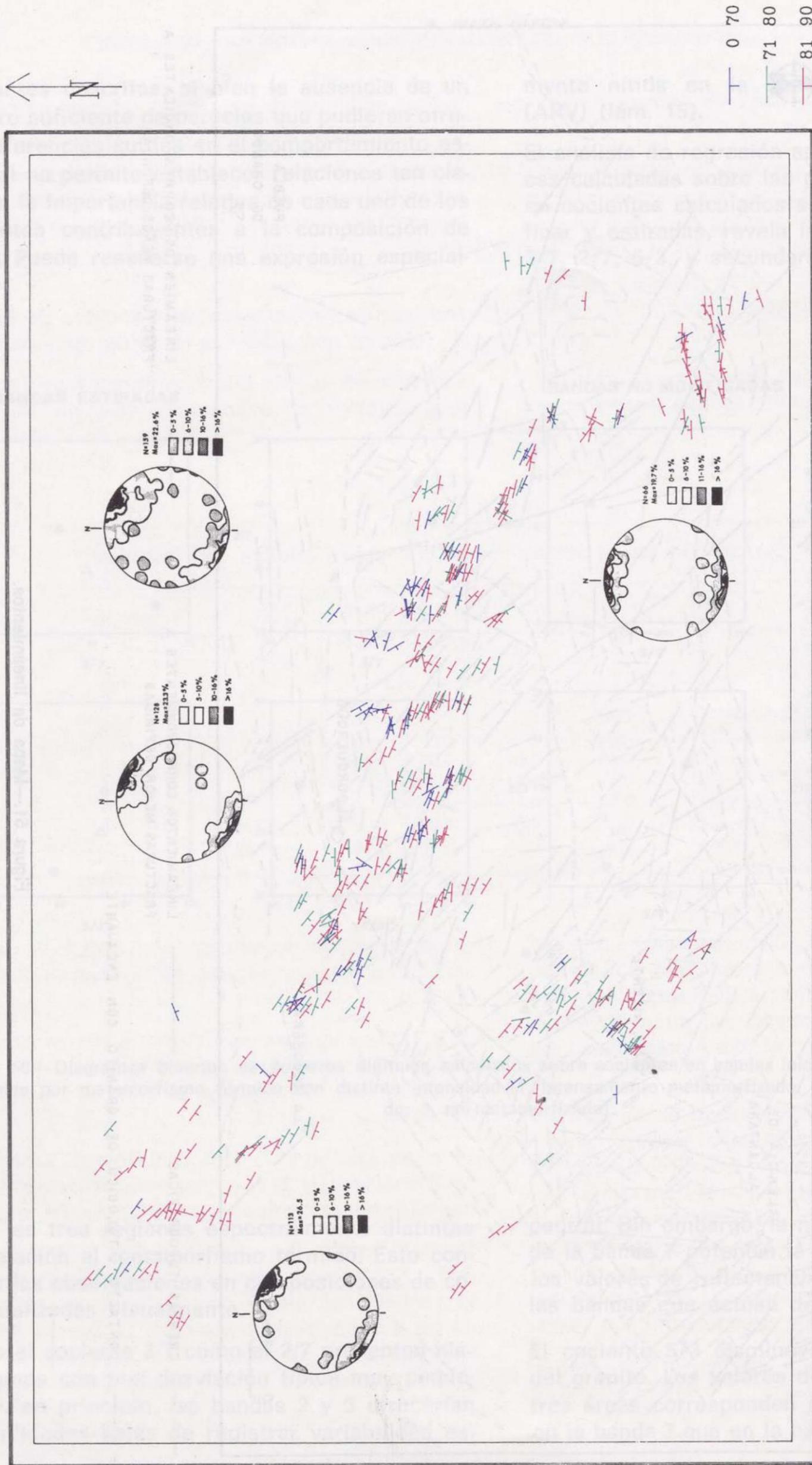


Figura 51.—Mapa de lineamientos.

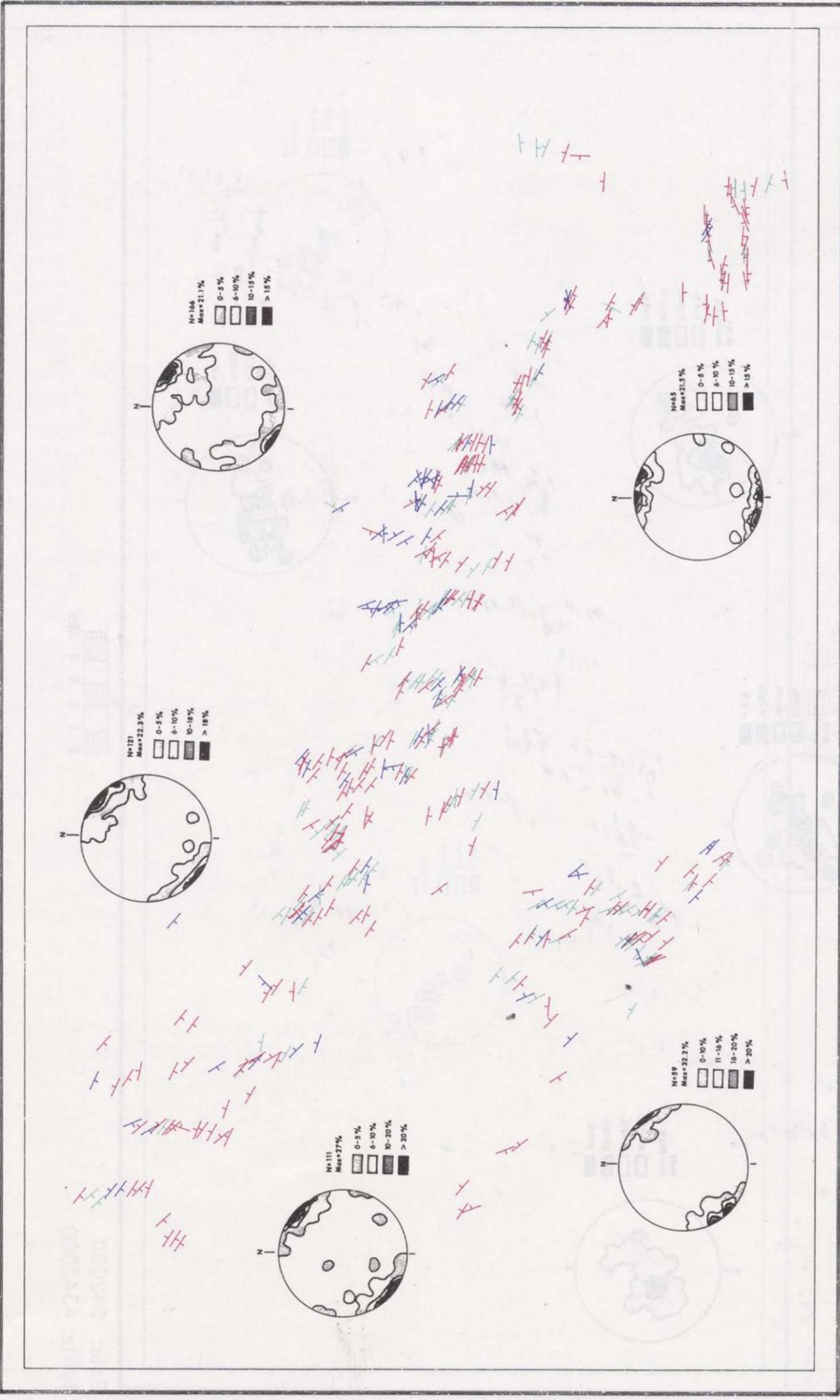
Norte: 4375000  
Este: 699000



Este: 642000  
Norte: 4342000

Figura 52.—Representación de superficies de estratificación, con ángulos de buzamiento codificados en color y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica polar en plantilla equiárea de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

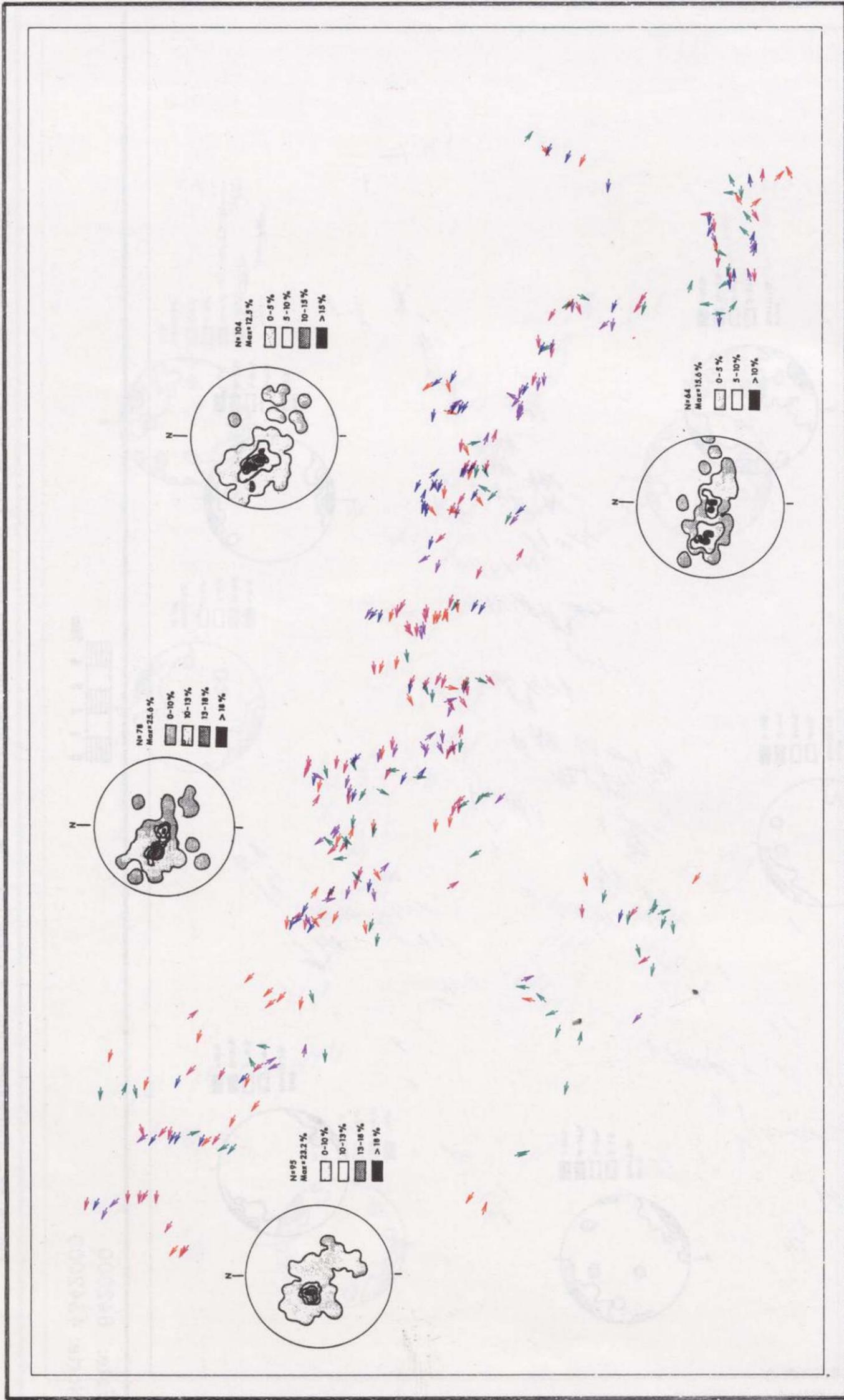
Norte: 4375000  
Este: 699000



Este: 642000  
Norte: 4342000

Figura 53.—Representación de superficies de esquistosidad hercínica principal, con ángulos de buzamiento codificados en color y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica polar en plantilla equiárea de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

Norte: 4375000  
Este: 699000



Este: 642000  
Norte: 4342000

Figura 54.—Representación de lineaciones de intersección entre superficie de estratificación y superficie de esquistosidad hercínica principal, con ángulos de buzamiento codificados en color y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

Norte: 4375000  
Este: 699000

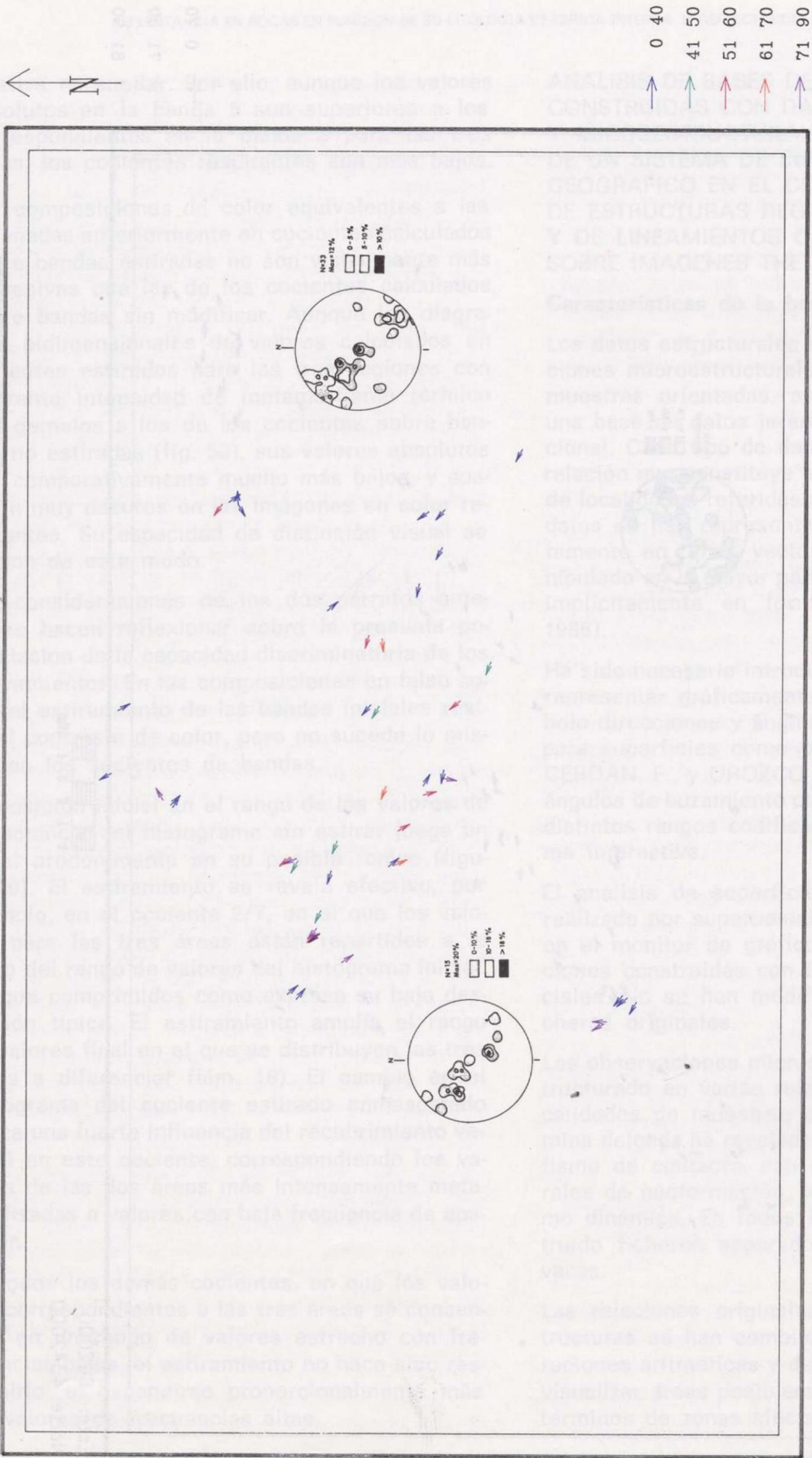
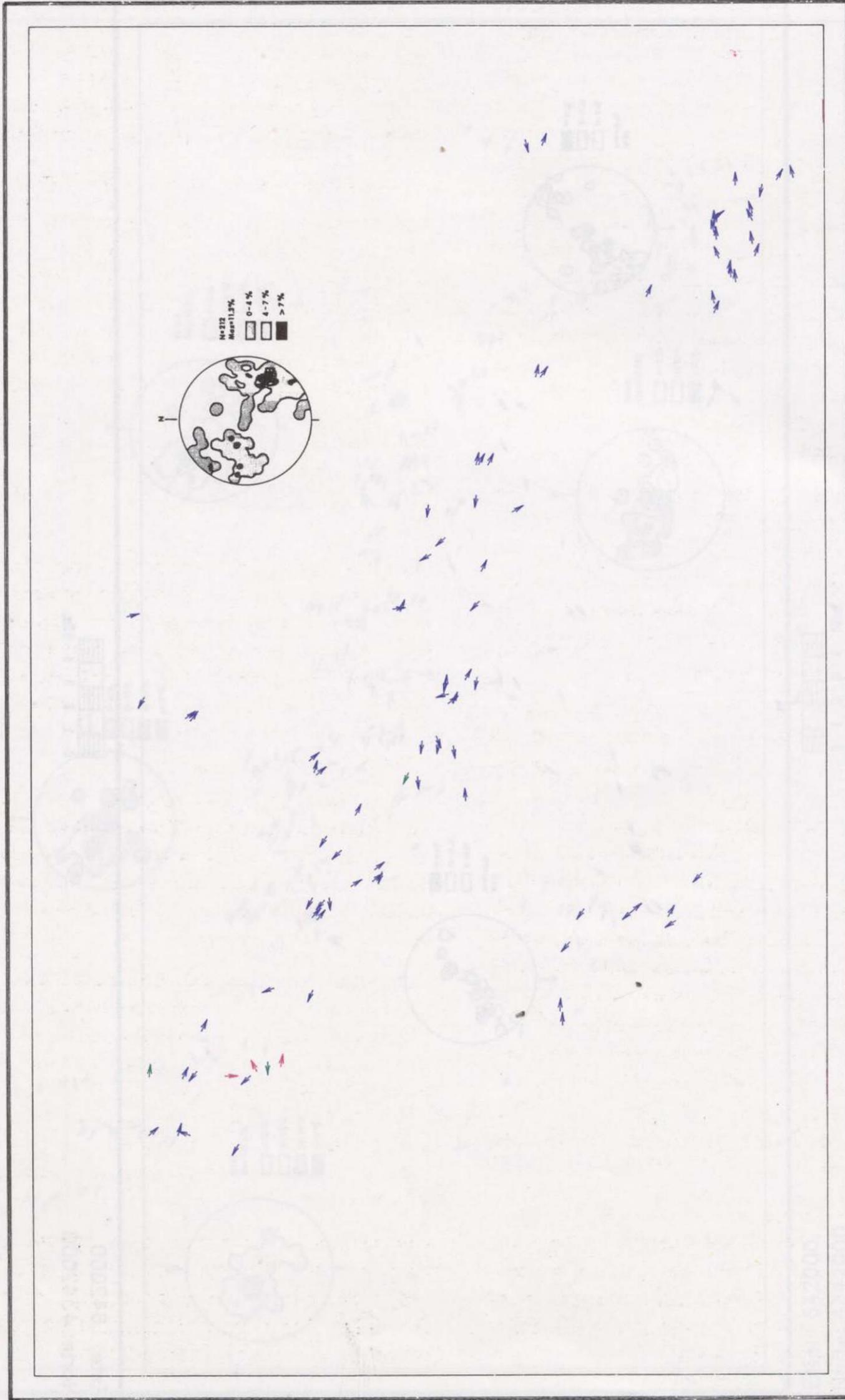


Figura 55.—Representación de ejes de pliegues, con ángulos de buzamiento codificados en color, y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

Norte: 4375000  
Este: 699000



Este: 642000  
Norte: 4342000

Figura 56.—Representación de lineaciones de intersección entre superficie de crenulación subhorizontal hercínica tardía y superficie de esquistosidad hercínica principal, con ángulos de buzamiento codificados en color y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

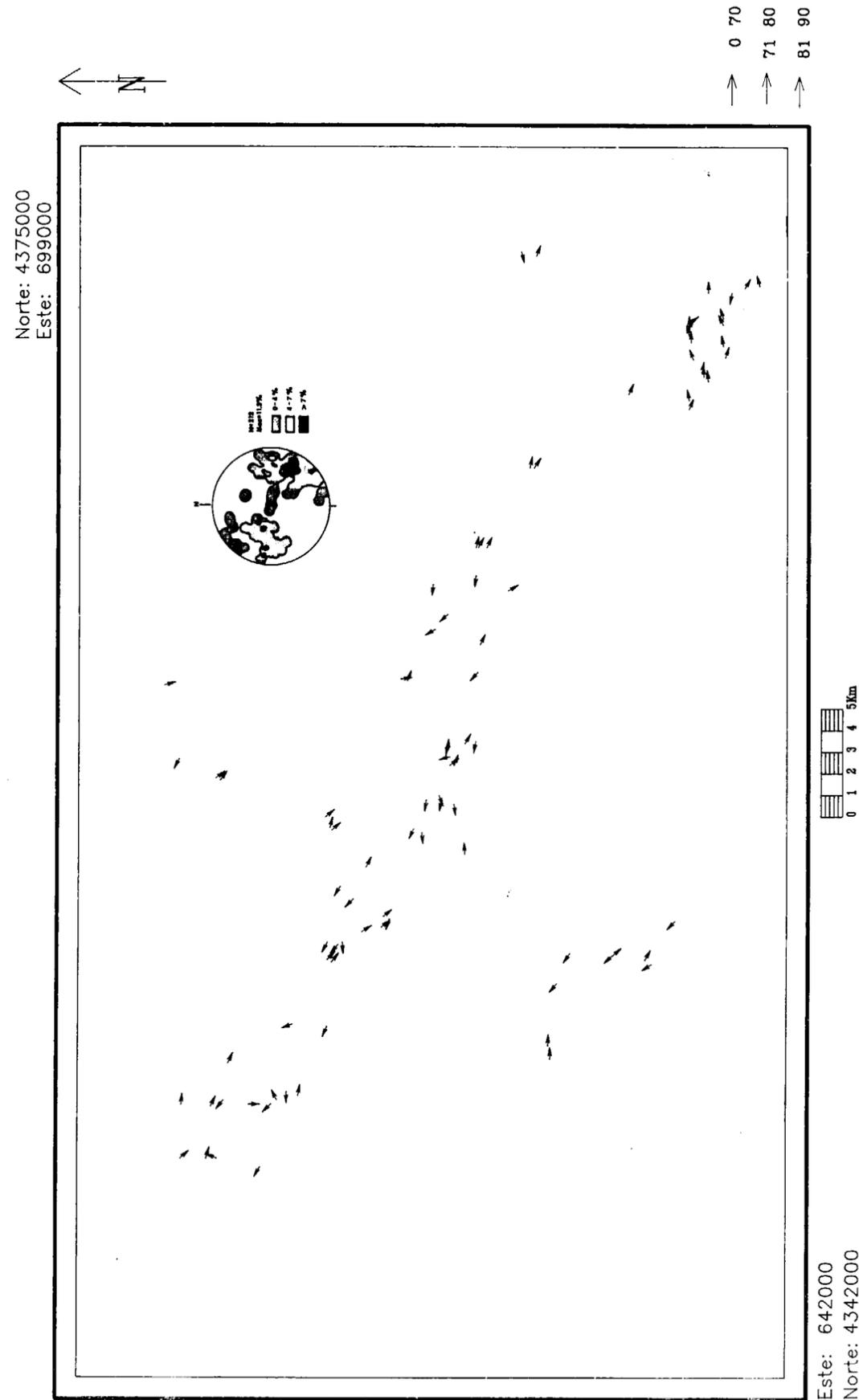


Figura 56.—Representación de lineaciones de intersección entre superficie de esquistosidad de crenulación subhorizontal hercínica tardía y superficie de esquistosidad hercínica principal, con ángulos de buzamiento codificados en color y diagramas de contornos sobre proyección estereográfica en plantilla equiareal de Schmidt, hemisferio inferior, en regiones señaladas.

relativa es similar. Por ello, aunque los valores absolutos en la banda 5 son superiores a los correspondientes en la banda 3 para las tres áreas, los cocientes resultantes son más bajos.

Las composiciones de color equivalentes a las reseñadas anteriormente en cocientes calculados sobre bandas estiradas no son visualmente más expresivas que las de los cocientes calculados sobre bandas sin modificar. Aunque los diagramas bidimensionales de valores calculados en cocientes estirados para las tres regiones con diferente intensidad de metamorfismo térmico son gemelos a los de los cocientes sobre bandas no estiradas (fig. 50), sus valores absolutos son comparativamente mucho más bajos, y aparecen muy oscuros en las imágenes en color resultantes. Su capacidad de distinción visual se reduce de este modo.

Las consideraciones de los dos párrafos anteriores hacen reflexionar sobre la presunta potenciación de la capacidad discriminadora de los estiramientos. En las composiciones en falso color, el estiramiento de las bandas iniciales realza el contraste de color, pero no sucede lo mismo en los cocientes de bandas.

La posición inicial en el rango de los valores de reflectancia del histograma sin estirar juega un papel predominante en su posible realce (figura 50). El estiramiento se revela efectivo, por ejemplo, en el cociente 2/7, en el que los valores para las tres áreas están repartidos a lo largo del rango de valores del histograma inicial, aunque comprimidos como expresa su baja desviación típica. El estiramiento amplía el rango de valores final en el que se distribuyen las tres áreas a "diferenciar" (lám. 18). El cambio en el histograma del cociente estirado enmascarado indica una fuerte influencia del recubrimiento vegetal en este cociente, correspondiendo los valores de las dos áreas más intensamente metamorfizadas a valores con baja frecuencia de aparición.

En todos los demás cocientes, en que los valores correspondientes a las tres áreas se concentran en un rango de valores estrecho con frecuencias bajas, el estiramiento no hace sino restringirlo, al expandirse proporcionalmente más los valores de frecuencias altas.

#### ANÁLISIS DE BASES DE DATOS ESPACIALES CONSTRUIDAS CON DATOS ESTRUCTURALES Y MICROESTRUCTURALES POR MEDIO DE UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICO EN EL CEG. INTERPRETACION DE ESTRUCTURAS REGIONALES Y DE LINEAMIENTOS CARTOGRAFICOS SOBRE IMAGENES THEMATIC MAPPER

##### Características de la base de datos

Los datos estructurales de campo y las observaciones microestructurales al microscopio sobre muestras orientadas, se han implementado en una base de datos jerárquica modificada a relacional. Cada tipo de dato se ha asignado a una relación que constituye un fichero independiente de localidades referidas a coordenadas UTM. Los datos se han representado en principio implícitamente en forma vectorial, si bien se han manipulado en la mayor parte de las combinaciones implícitamente en forma raster (BURROUGH, 1986).

Ha sido necesario introducir modificaciones para representar gráficamente por medio de un símbolo direcciones y ángulos de buzamiento, tanto para superficies como para lineaciones (PEREZ CERDAN, F., y OROZCO CUENCA, T., 1990). Los ángulos de buzamiento pueden representarse con distintos rangos codificados con colores de forma interactiva.

El análisis de superficies y lineaciones se ha realizado por superposición visual de relaciones en el monitor de gráficos, a partir de las relaciones construidas con los datos de campo iniciales. No se han modificado, por tanto, los ficheros originales.

Las observaciones microestructurales se han estructurado en varias relaciones en forma de localidades de muestreo donde el estudio de lámina delgada ha revelado influencia de metamorfismo de contacto, con expresión de los minerales de neoformación, o signos de metamorfismo dinámico. En todos los casos se han construido ficheros separados para pelitas y grauvacas.

Las relaciones originales basadas en microestructuras se han combinado por medio de operaciones aritméticas y de álgebra de Boole, para visualizar áreas posiblemente cartografiables en términos de zonas afectadas por metamorfismo

térmico, y zonas comparativamente más deformadas, y las interacciones entre ambas.

Las relaciones basadas en microestructuras se han superpuesto gráficamente a imágenes Thematic Mapper corregidas geométricamente, lineamientos, y relaciones de superficies y lineaciones para establecer posibles conexiones entre los distintos acontecimientos de la historia geológica reflejada por las pelitas y grauvacas del Complejo esquistos-grauváquico, y la reflectancia espectral de rocas y suelos observadas en imágenes de satélite.

### Los lineamientos

Para la cartografía de lineamientos se ha utilizado una imagen monoscópica en papel Thematic Mapper, banda 7, de fecha 26 de enero de 1986. Se han combinado observaciones sobre la misma imagen a escala 1:500.000, 1:200.000 y 1:100.000 para obtener una observación visual más completa. A causa de la topografía más suave, y a sus características litológicas, el CEG registra una densidad de lineamientos menor que las restantes litologías del área de estudio, o bien estos lineamientos están representados con menor nitidez.

Sin embargo, una atención especial a las leves variaciones geomorfológicas que el CEG despliega permite distinguir algunas diferencias, que están fundamentalmente correlacionadas con diferencias en topografía y uso de suelo (fig. 51). De modo general, los lineamientos que aparecen sobre el CEG son de menor longitud que en el granito o en el Paleozoico.

La porción situada en el flanco sur del granito de Nisa-Albuquerque ofrece un sistema apretado de lineamientos en dirección NNE-SSO que probablemente tienen una mayor expresión por situarse transversalmente al trazado de las Riberas del Fraile y de Alcorneo. Estos dos cursos de drenaje definen dos lineamientos mayores en dirección ONO-ESE, paralela a las estructuras mayores descritas por los materiales paleozoicos inmediatamente adyacentes. De manera amortiguada, son visibles en el extremo sur-oriental las prolongaciones de varias fracturas ENE-OSO que se manifiestan muy evidentemente en el paleozoico y el granito.

La amplia faja de materiales precámbricos que se extiende al norte del granito de Nisa-Albuquerque presenta diferencias en la densidad y distribución de lineamientos en tres regiones diferentes.

Entre Valencia de Alcántara y San Vicente de Alcántara, la densidad de lineamientos es mayor que en el resto. Los lineamientos más largos siguen una dirección NO-SE. Les acompaña una red densa en dirección perpendicular de lineamientos más cortos, que coinciden con las direcciones de las superficies de estratificación y esquistosidad en el área. También aparece otro conjunto denso y de escasa longitud en dirección ENE-OSO.

La región central cercana al estrangulamiento del granito, de topografía más homogénea, presenta la densidad de lineamientos más baja, así como la mayor heterogeneidad en orientaciones geográficas. Con la excepción de los lineamientos que son prolongación de algunas fracturas transversales al trazado de las capas cuarcíticas paleozoicas que forman el límite septentrional, todos los lineamientos son muy cortos.

Más al este, la densidad de arbolado modera la densidad de lineamientos que cabría esperar en función de la topografía, situándola en términos intermedios. Sin duda por la proximidad de la Falla de Plasencia, los lineamientos mayores siguen direcciones paralelas o ligeramente oblicuas a la misma. También hay un cortejo representativo de lineamientos de menor longitud en dirección NE-SO, formando aproximadamente 30° con la Falla de Plasencia. En el núcleo del sinclinal de la Sierra de San Pedro, al este de la Falla de Plasencia, aparecen varios lineamientos en abanico que representan fracturas producidas por ajustes de esta estructura mayor al desplazamiento horizontal levógiro ocasionado por la misma.

La gran mayoría de los lineamientos cartografiados siguen, bien las direcciones de las estructuras hercínicas mayores ONO-ESE, bien las direcciones representadas por la fracturación tardihercínica (PARGA, 1969 ARTHAUD y MATTE, 1975), que en esta región son fundamentalmente la Falla de Aientejo-Plasencia y direcciones asociadas.

Se trata de fallas de desplazamiento horizontal en dos direcciones conjugadas, predominando la

NE-SO en sentido levógiro, perpendicular a la dirección de las estructuras mayores. La segunda coincide con las direcciones de las estructuras mayores, y tendría sentido dextro. Este sistema de fallas de desplazamiento horizontal se habría originado por una compresión N-S durante el Estefaniense Superior y Pérmico Inferior, simultáneamente al emplazamiento de los granitos tardíos.

En el área de estudio, la unidad del granito de Albuquerque está fuertemente desplazada por la Falla de Plasencia, indicando un emplazamiento anterior a la etapa de fracturación. Sin embargo, estas fracturas han jugado en orogenias posteriores, por lo que la edad relativa de ambos acontecimientos debe apoyarse en datos complementarios.

Los lineamientos mayores presentan distintas tendencias al este u oeste de la región central con menor densidad de lineamientos y direcciones relativamente más variadas que coincide con el estrangulamiento en el granito. Al oeste predominan rasgos largos NNO-SSE, mientras que al este son las direcciones NE-SO de la Falla de Plasencia y otras más tendidas al este, las que dibujan los trazos más continuados.

Una diversificación similar se observa en las dos unidades del granito a ambos lados del estrangulamiento central, presentando la occidental una densidad de lineamientos considerablemente mayor que la unidad del Albuquerque, así como direcciones diferentes. Es notable la casi total ausencia de lineamientos en dirección NO-SE en la unidad de Albuquerque.

### Superficies de estratificación y esquistosidad hercínica principal

De modo generalizado, tanto la estratificación como la esquistosidad hercínica principal se presentan en posición vertical, y en dirección NO-SE paralela a la dirección de las estructuras mayores, formando un ángulo bajo entre sí, circunstancia que explica la verticalidad de la mayor parte de las lineaciones de intersección. De acuerdo con el esquema descrito para las estructuras menores, las superficies de estratificación se sitúan en una dirección ligeramente oblicua, más E-O que las superficies de esquistosidad (figs. 52 y 53).

Sin embargo, hay algunas variaciones que acompañan a la distribución heterogénea en distintos sectores del área estudiada, tanto de los pliegues como de las lineaciones de intersección entre las dos superficies.

A lo largo del contacto septentrional del granito, y en los sectores lejanos del estrangulamiento próximo a San Vicente de Alcántara y a la Falla de Plasencia, las estratificaciones y superficies de esquistosidad acompañantes buzan regularmente al sur en el sector de Valencia de Alcántara, y al norte en el de Albuquerque, manteniendo una dirección horizontal paralela al contacto con el granito. Las superficies tienden a verticalizarse cerca del contacto con el granito.

Las polaridades estratigráficas más abundantes al sur observadas en el campo (fig. 57) confirman la geometría observada en afloramiento de flancos directos largos, y, por lo tanto, mejor representados espacialmente, y flancos inversos cortos. La zona de mayor replegamiento, y heterogeneidad en la dirección de las polaridades estratigráficas coincide con la región anómala observada en imágenes a la altura del río Alburrel, y que coincide con la finalización del área de influencia del metamorfismo térmico. Asimismo, las rocas, tanto pelitas como grauvacas, muestran texturas miloníticas.

En el contacto oriental al oeste del río Zapatón, tanto las estratificaciones como las esquistosidades hercínicas principales se disponen excepcionalmente verticales, manteniendo una horizontal en dirección E-O perpendicular al contacto con el granito, con vergencias alternantes al norte y al sur. Las superficies de esquistosidad se diversifican en dos direcciones predominantes en este contacto oriental, una E-O, y otra ligeramente oblicua a la anterior ONO-ESE, más próxima a la disposición general, aunque rotada levógiro respecto a la misma. Ocurre lo mismo en el contacto meridional oriental de la unidad de Alcántara. En el contacto meridional occidental de la unidad de Albuquerque, en las cercanías del Arroyo del Caballo, los buzamientos dominantes apuntan al sur, y se enderezan al alejarse del granito.

Las superficies de esquistosidad principal forman ángulos muy bajos con la estratificación, como resultado del plegamiento apretado en plie-

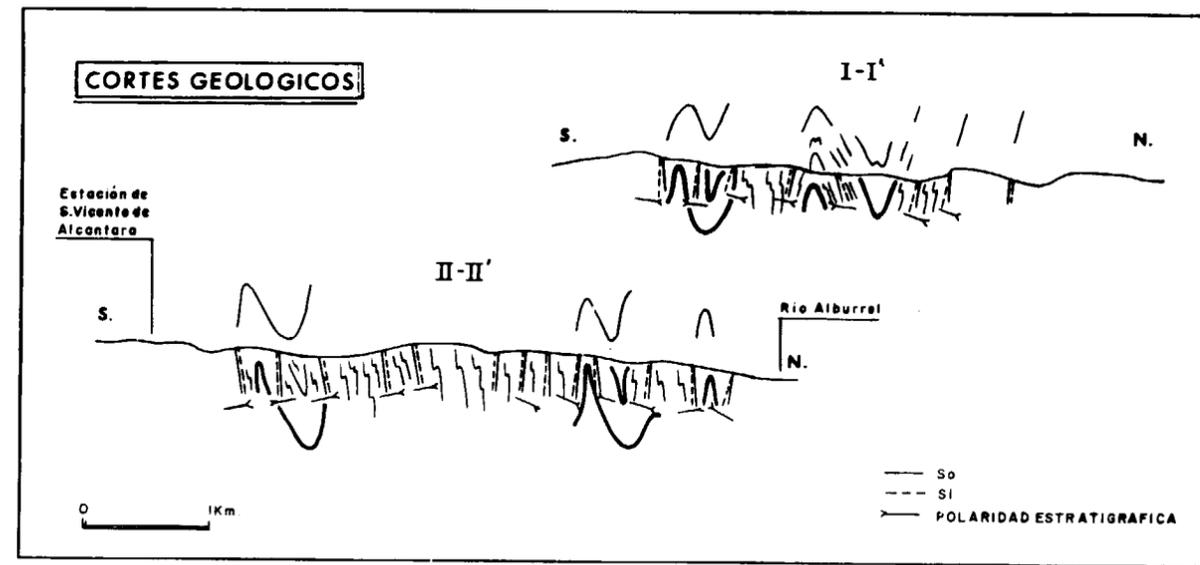


Figura 57.—Corte estructural en dirección SSO-NNE entre Valencia de Alcántara y el Cerro de los Lapones (situación en figura 44).

gues asimétricos. En las zonas más replegadas, aparecen ángulos mayores entre ambas superficies, apreciables en la región del estrangulamiento del granito cerca de San Vicente de Alcántara, en los alrededores del Castillo de Mayorga, y en las cercanías de la Falla de Plasencia. En el sector al norte de la unidad de Albuquerque, se observan ángulos mayores entre ambas superficies en zonas alejadas del contacto con el granito, y con buzamientos relativamente horizontalizados.

#### Lineaciones de intersección hercínicas principales

Las lineaciones de intersección entre la esquistosidad principal y la estratificación presentan una disposición mayoritariamente paralela a las direcciones de las estructuras mayores NO-SE (fig. 54), con buzamientos próximos a la vertical, siempre superiores a sesenta grados sobre la proyección horizontal.

En el área más cercana a Portugal la dirección de las lineaciones es excepcionalmente constante, con buzamientos que se horizontalizan progresivamente desde el contacto con el granito hacia el norte, donde toman buzamientos que oscilan entre 50° y 60°. Esta tendencia se intensi-

fica en las inmediaciones de la estación de San Vicente de Alcántara, donde los buzamientos son superiores a 70° cerca del contacto con el granito, y llegan a valores cercanos a los 40° al alejarse del mismo.

En los alrededores del Arroyo Alpotrel, al este de Valencia de Alcántara, se aprecia un desordenamiento tanto en direcciones como en ángulos de buzamiento, que cristaliza en lineaciones más verticales cerca del granito, indicando cierto replegamiento. El tramo intermedio del arroyo recoge inclinaciones intermedias entre 40° y 50°, y las lineaciones vuelven a verticalizarse cerca de la desembocadura en el río Alburral.

En la región cercana al estrangulamiento del granito, las lineaciones se distribuyen en dos grupos, unas verticales, y otras en dirección ONO-ESE menos verticalizadas.

A lo largo del contacto septentrional de la unidad de Albuquerque, las lineaciones de intersección difieren en su distribución respecto a las del área inmediata a Valencia de Alcántara en dirección y ángulos de buzamiento más heterogéneos espacialmente. No hay verticalización cerca del contacto con el granito, y al contrario que en el área anterior, los buzamientos más verticales se registran en la región central de

la banda entre el contacto del granito y el paleozoico septentrional.

Es de destacar la existencia de lineaciones excepcionalmente horizontales en las inmediaciones de la Charca del Macho, próximas a los 30°, donde se han observado asimismo texturas miloníticas. Entre el Cerro de Santa María y el granito, las direcciones se mantienen constantemente paralelas a las direcciones de las estructuras mayores, probablemente por efecto de la compresión entre los materiales competentes de las cuarcitas ordovícicas y el granito, sobre el conjunto relativamente más plástico del Complejo esquistograuváquico.

La desorganización se incrementa también hacia el este por efecto de la Falla de Plasencia.

En el borde oriental del granito de Nisa-Albuquerque, al oeste del río Zapatón, el contacto se dispone aproximadamente paralelo a la Falla de Plasencia, que lo desplaza con claridad. Al igual que en el contacto septentrional del granito entre Valencia de Alcántara y San Vicente de Alcántara, las lineaciones de intersección se verticalizan cerca del mismo. Sin embargo, las direcciones rotan hasta una disposición generalizada E-O, perpendicular al contacto del granito, que se aproxima a la N-S. Del mismo modo que las esquistosidades hercínicas principales, aparecen dos máximos bien definidos, uno de ellos vertical, y el otro buzando al oeste. Asimismo, aparecen ángulos de buzamiento horizontales con vergencias al este en las zonas más alejadas al contacto.

#### Pliegues

El Complejo esquistograuváquico en el área de estudio no ofrece gran abundancia de pliegues a escala de afloramiento. Su distribución no es uniforme a lo largo de la banda estudiada, sino que aparecen en las inmediaciones del estrangulamiento del granito de Nisa-Albuquerque, y en el sector comprendido entre el mismo y la Falla de Plasencia.

En el cuello del granito, los ejes de los pliegues se agrupan en dos conjuntos muy verticalizados, uno con buzamientos comprendidos entre 50° y 90°, dirección NO, y otro buzante al sureste (figura 55). Este segundo grupo se concentra en las proximidades del Regato de las Torres.

La región al sur del granito, en las inmediaciones de Mayorga, presenta características especiales, tanto por estar comprendida en el área de influencia del estrangulamiento del granito, como por la compresión producida entre los dos materiales competentes del granito y las cuarcitas paleozoicas. Destacan direcciones N-S buzantes al norte en el punto de curvatura más acentuado del contacto del granito al noroeste, mientras que en el contacto oriental los ejes de los pliegues buzant al noroeste con ángulos de buzamiento más tendidos.

En la amplia franja del CEG que se extiende al norte del granito de Nisa-Albuquerque, al este de San Vicente de Alcántara, los ejes de los pliegues presentan direcciones y buzamientos constantes al noroeste. Alrededor de la Casa de las Grulleras, se horizontalizan y giran situándose en posición este-oeste.

#### Superficies de esquistosidad de crenulación hercínicas tardías

Las superficies de esquistosidad de crenulación subhorizontales perpendiculares a las superficies de esquistosidad hercínica principal se disponen con una horizontal paralela a las mismas en la amplia franja al norte del granito de Nisa-Albuquerque. Tienden a verticalizarse ligeramente en las cercanías del contacto, y asimismo buzant hacia el norte entre Valencia de Alcántara y San Vicente de Alcántara. Al este del estrangulamiento hasta la Falla de Plasencia giran horizontalizándose y buzando al sureste o este.

En el borde oriental paralelo al río Zapatón, las esquistosidades de crenulación se disponen con horizontales paralelas al contacto con el granito, en dirección N-S, y buzant constantemente al este con ángulos más tendidos que en el contacto septentrional. La lineación de intersección de la esquistosidad de crenulación con la esquistosidad hercínica principal describe leves cabeceos, sin dejar su dirección E-O, ni de buzant al este (fig. 56).

El conjunto de las lineaciones de intersección entre esta superficie de crenulación y la superficie de esquistosidad hercínica principal describe una trayectoria en dirección ESE-ONO, con fuerte énfasis en las direcciones subhorizontales al ESE.

El giro que las superficies de esquistosidad de crenulación describen envolviendo el granito sugiere una fuerte relación con el emplazamiento del mismo. Aunque su repartición espacial es generalizada en todo el área de estudio, se ha observado una mayor intensificación en las proximidades de fracturas o zonas de cizalla tardihercínicas. Las microestructuras revelan la crenulación de minerales formados por efectos térmicos de la masa ígnea, sugiriendo una posterioridad respecto al crecimiento de dichos minerales en las aureolas de metamorfismo de contacto. Todo ello apunta a una contemporaneidad relativa de los acontecimientos descritos, encuadrados en las fases tardías de la deformación hercínica.

#### Distribución cartográfica de observaciones microestructurales

Las observaciones realizadas sobre lámina delgada respecto a microestructuras se ha representado en localidades codificadas para expresar características relacionadas con metamorfismo de contacto, metamorfismo regional y dinámico, así como la aparición de esquistosidades diferentes a la esquistosidad hercínica principal. En todos los casos se han distinguido efectos en pelitas y grauvacas.

Los puntos así codificados se han superpuesto visualmente a imágenes Thematic Mapper para tratar de comprobar la relación entre las diferencias espectrales observadas en las mismas, y la posición geográfica de muestras en las que se habían descrito la influencia de los procesos antes mencionados (lám. 19).

Puesto que las corneanas tienen una extensión tan limitada, sólo se han localizado geográficamente pizarras mosqueadas, y muestras con biotita. Las muestras de pizarras en que se aprecian máculas coinciden con las áreas que las imágenes Thematic Mapper sugieren como afectadas por el metamorfismo de contacto. Las muestras con biotita son demasiado escasas para establecer conclusiones sobre su extensión cartográfica.

Las esquistosidades de crenulación hercínica tardías muestran una distribución generalizada en todo el área de estudio (lám. 20). Lo mismo puede decirse de las esquistosidades anteriores

a la hercínica principal, aunque el número de observaciones es escaso.

En cuanto a las muestras que presentan efectos de metamorfismo dinámico, se produce una diferenciación en distribución geográfica, ya se trate de pelitas o grauvacas (lám. 19). Las pelitas protomilonitizadas se concentran en la franja paralela a la falla de Plasencia, que pasa por el estrangulamiento del granito, tanto al norte como al sur del mismo.

Siendo las pelitas rocas más plásticas donde los efectos de la recristalización son más evidentes, y habiéndose basado las observaciones en la intensificación de orientación preferente en rocas de grano muy fino, esto confirma un estilo de deformación diferente en la franja mencionada, con características de zona de cizalla débilmente desarrollada.

#### DISCUSION

De modo general, las superficies de estratificación y esquistosidad hercínica principal muestran una disposición solidaria describiendo un giro progresivo desde una disposición muy homogénea en dirección NO-SE buzante al NO en el extremo occidental, hasta adoptar una disposición E-O en el contacto oriental del granito de Nisa-Alburquerque. La rotación va acompañada de una diversificación relativa de ángulos y direcciones de oeste a este, que finaliza en una distribución bimodal de esquistosidades hercínicas principales en la sección oriental del área estudiada, con la incorporación de superficies este-oeste a otras con dirección similar a las anteriores.

Las lineaciones de intersección entre ambas superficies describen una evolución similar desde una distribución muy homogénea hasta una distribución bimodal en la que aparecen pliegues verticales.

Esta distribución bimodal se repite en la región más oriental, al este de la Falla de Plasencia, no sólo para las superficies de estratificación y esquistosidad y sus correspondientes lineaciones de intersección, sino para los ejes de pliegues, en la región central a la altura del estrangulamiento que divide el granito de Nisa-Albur-

querque en dos unidades, y que tiene la geometría en imágenes de satélite de una banda ancha de unos 3 km. de anchura en dirección NNE-SSO paralela a la Falla de Alentejo-Plasencia (lámina 15).

Este giro en las direcciones de las superficies de esquistosidad ha sido interpretado (SANDERSON, 1990), como efecto del desplazamiento horizontal levógiro de la zona de cizalla de Porto-Badajoz-Córdoba (LEFORT y RIBEIRO, 1980), que se sitúa a poca distancia al sur de la región de estudio. Los pliegues sardos de eje vertical se habrían formado en escalón a ambos lados de la misma acompañando al desplazamiento horizontal. A esta disposición se le superpondría la deformación hercínica principal con cabalgamientos y pliegues de eje subhorizontal vergentes al norte, acompañados de la intrusión de granitos en dos etapas.

Sin embargo, tanto las esquistosidades hercínicas principales, como las superficies de estratificación, sus lineaciones de intersección correspondientes y los ejes de los pliegues, presentan una distribución bimodal en la franja descrita a la altura del estrangulamiento en el granito, tanto al norte como al sur del mismo, y manteniendo una dirección general NNE-SSO.

El giro del conjunto de las estructuras hasta una dirección E-O sólo se constata al este de la Falla de Plasencia, donde también presentan distribuciones fuertemente bimodales, pasando por distribuciones intermedias en el sector septentrional de la unidad de Alburquerque.

De este modo, actúan como límites entre zonas en que se aprecia un cambio de dirección en superficies, tanto de estratificación como de esquistosidad principal, la franja correspondiente a la zona del estrangulamiento, y la Falla de Plasencia. Estos accidentes relacionados con la etapa de fracturación tardihercínica parecen compartimentar el área estudiada en dominios, a modo de kink-bands a gran escala con ángulo alto entre flancos (POWELL, COLE y CUDAHY, 1985).

Existen divergencias entre las lineaciones de intersección y los ejes de los pliegues, presentando los últimos disposiciones más variadas. Los pliegues tienen una aparición menos frecuente, y sólo se observan en áreas restringidas de la zona de estudio. Los datos recogidos suelen pro-

ceder de pliegues observados en capas de grauvacas, que facilitan su observación.

Las lineaciones de intersección pueden ser más representativas de variaciones espaciales de orientación experimentadas en pelitas, que experimentan un apretamiento más intenso, y son menos propensas a la variabilidad introducida por refracciones en la esquistosidad al atravesar capas de distinta competencia.

Los pliegues se prodigan en la región del estrangulamiento del granito, que se propone como una zona de cizalla de débil desarrollo en dirección paralela a la Falla de Plasencia. Los movimientos de desplazamiento horizontal levógiro han modificado la disposición original de los mismos, como muestra la concentración en dos máximos bien definidos, cuyo plano bisector coincide con la dirección de la fractura mencionada. Los pliegues de eje vertical desaparecen para situarse buzando al SSO.

Los lineamientos observados en imágenes Thematic Mapper muestran una menor frecuencia de direcciones NNE-SSO, tanto en la unidad granítica de Alcántara, como en la porción de Complejo esquisto-grauváquico que aflora al norte de la misma, mientras que se intensifican al este de la zona de cizalla que pasa por el estrangulamiento del granito.

La variación de actitud de las estructuras parece deberse en última instancia a la influencia de la fracturación tardihercínica. Esta fracturación compartimentada en dominios la banda septentrional girando levemente las direcciones de superficies de estratificación y esquistosidad principal, desarrolla una zona de cizalla poco intensa paralela a las direcciones de fracturación dominantes que pasa por el estrangulamiento que separa las dos unidades en el granito, y hace rotar los ejes de los pliegues, tanto en la zona de cizalla como en la Falla de Plasencia hasta disponerse en dos direcciones simétricas respecto a la dirección de la misma.

Acompaña a esta fracturación una intensificación de la esquistosidad de crenulación que se produce en las últimas etapas de la intrusión de granitos, y el desarrollo de kink-bands cuyos planos axiales describen un sistema conjugado asimétrico oblicuo a la superficie de esquistosidad principal, y subperpendicular a la fracturación hercínica dominante NE-SO.

El granito de Nisa-Albuquerque está considerado como un granito de emplazamiento tardío epizonal en la formación de la cadena hercínica (LOPEZ-PLAZA y MARTINEZ CATALAN, 1988). Muestra contactos rectilíneos paralelos a las estructuras mayores, con la excepción del estrangulamiento a la altura de San Vicente de Alcántara, y desarrolla una aureola de metamorfismo de contacto.

Se trataría de cuerpos aparentemente concordantes a favor de fracturas preexistentes, en una intrusión permisiva en una cámara magmática de gran extensión lateral controlada por los cabalgamientos previamente desarrollados durante la fase principal de la orogenia hercínica, por mecanismos de stopping y subsidencia cauldron (OEN ING SOEN, 1970).

La extensión de la aureola es muy estrecha en la unidad de Albuquerque, caracterizada por el desarrollo de una llanura estrecha y deprimida en la que no existen afloramientos. El conjunto presenta una forma en domo ovalado alargado en la dirección de las estructuras mayores, con paredes probablemente verticales.

No es así en la unidad de Alcántara, donde las imágenes Thematic Mapper muestran blastesis mineral por efecto del metamorfismo de contacto en un área de un par de kilómetros. Sin embargo, la actitud de las estructuras regionales en el encajante es sorprendentemente homogénea en este sector, si se exceptúa una cierta verticalización en las cercanías del contacto. Dado el tipo de emplazamiento, el techo del granito debe de estar muy próximo al nivel de erosión actual (PITCHER y BERGER, 1972). De este modo, la mayor amplitud de la aureola en la unidad de Alcántara correspondería a la cercanía del techo del cuerpo intrusivo, y el contacto se verticalizaría a la altura del río Alburrel, donde desaparece la aureola, y la superficie de esquistosidad de crenulación adopta una posición más horizontal.

Se desarrolla una esquistosidad de crenulación subhorizontal que se dispone como un envolvente respecto al granito, y que parece haberse intensificado con posterioridad al crecimiento de minerales por efecto térmico de la masa ígnea.

Las rocas encajantes mantienen sus actitudes regionales hasta el contacto. Superficies de estratificación y esquistosidad, y sus lineaciones de

intersección se verticalizan ligeramente en contacto de la unidad de Alcántara, y en el borde oriental de la unidad de Albuquerque, paralelo a la Falla de Plasencia. No así en el contacto septentrional de esta última unidad.

La unidad de Valencia de Alcántara y la unidad de Albuquerque presentan diferencias geomorfológicas, de estilo de fracturación, respuesta espectral, extensión de la aureola de metamorfismo de contacto, y distorsión del encajante que pueden permitir diferenciarlas como dos intrusiones sucesivas relativamente rápidas en el tiempo (OEN ING SOEN, 1970).

#### CONCLUSIONES

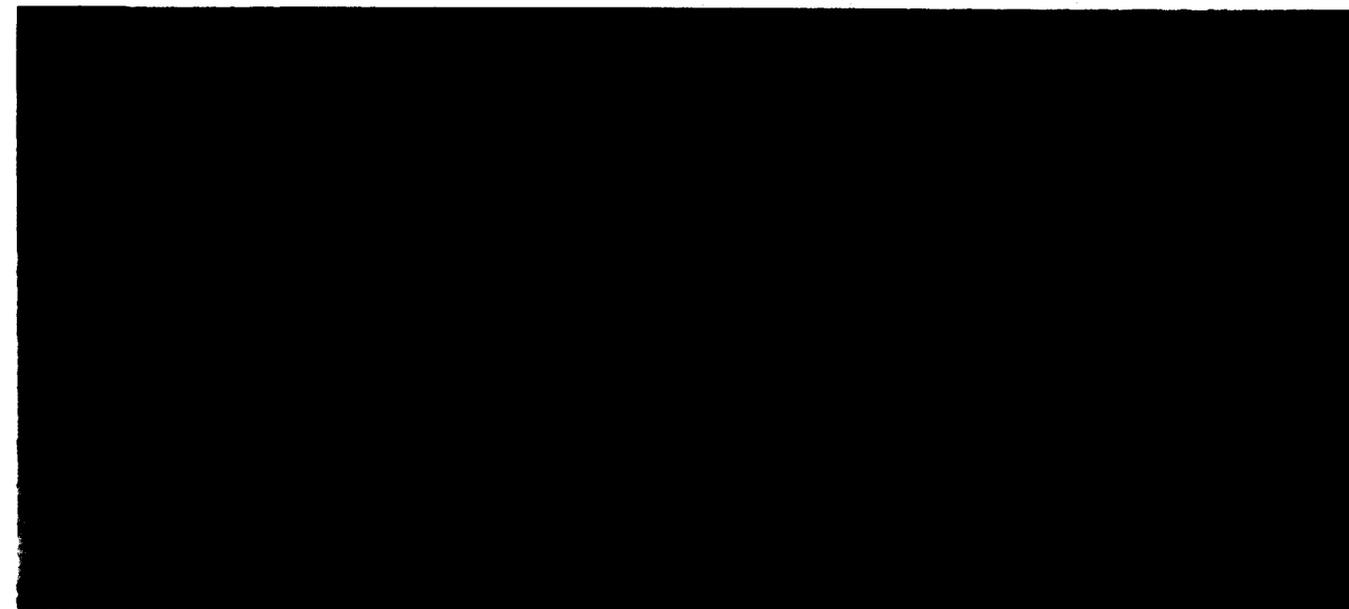
La reflectancia observada en superficies de estratificación tal y como aparecen en el afloramiento presentan puntos de absorción similares en pelitas y grauvacas. Se diferencian en una reflectancia global más intensa en grauvacas que en pelitas. El agua molecular, y los aniones  $\text{OH}^-$ , así como las transiciones electrónicas entre los iones ferroso y férrico, son responsables de las absorciones observadas.

Dos secciones cortadas con sierra en muestras de rocas, paralela y perpendicular respectivamente a la lineación de estiramiento mineral producida por procesos de metamorfismo regional, indica una reflectancia global mayor en la sección paralela a la dirección en la que cristalizan micas orientadas preferentemente. El mayor área cubierto por micas en estas secciones produce el citado aumento de reflectancia.

La forma de la curva de reflectancia en las secciones cortadas por sierra presenta de modo generalizado una caída hacia el azul en el visible, un umbral en  $0,55 \mu\text{m}$ , y una caída rectilínea con débiles absorciones hasta  $2,5 \mu\text{m}$ . Las pelitas y grauvacas con aspecto más oscuro por su mayor contenido en materia orgánica no registran la caída hacia el azul en el visible, sino que describen una recta de pendiente suave y uniforme en la totalidad del rango de longitudes de onda estudiado, al margen de leves absorciones.

Una deformación intensa por cizalla produciendo una textura fuertemente heterogranular, y abundancia de arcillas y micas en la matriz, provoca

#### LAMINA 8

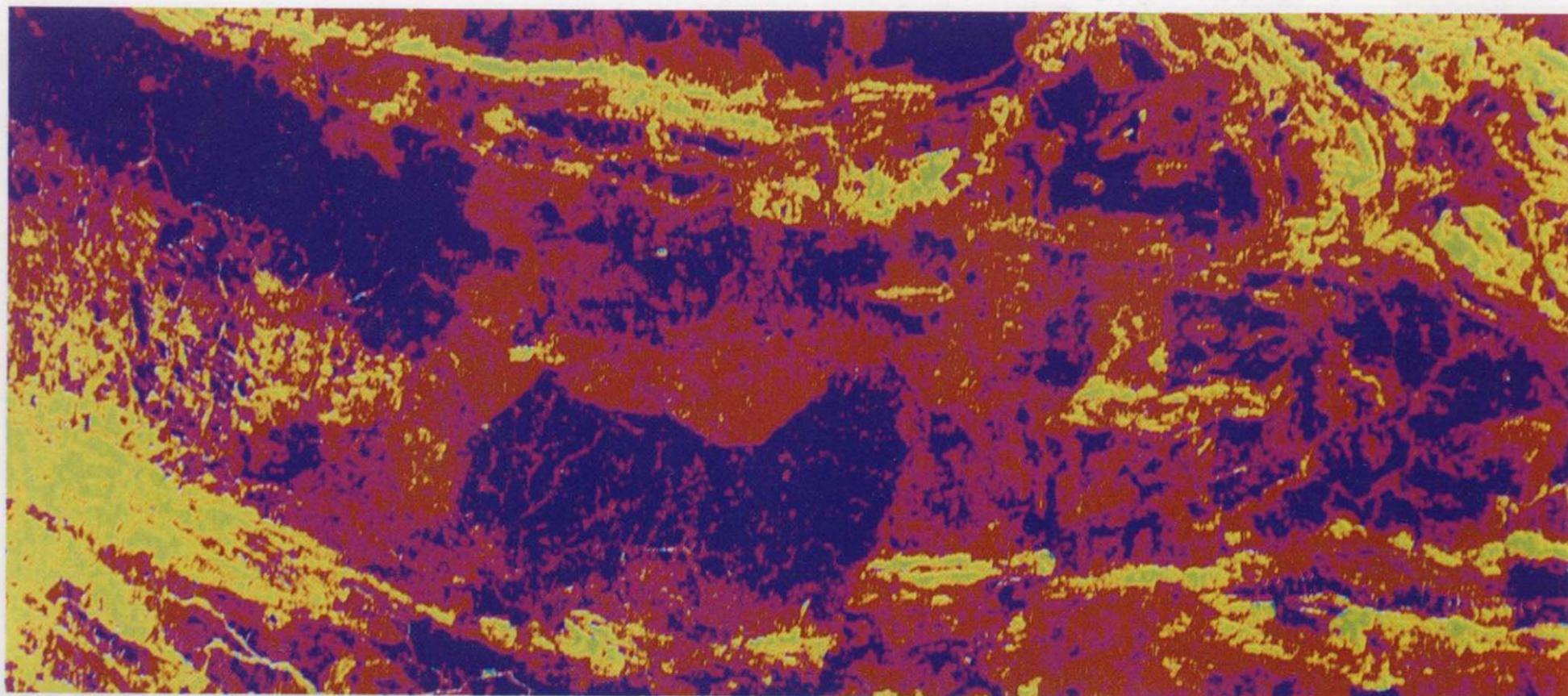


Segmentación de intervalos de números digitales en el cociente 4/3 calculado sobre bandas no modificadas. Azul, valores bajos; rojo, intermedios; verdes, altos.

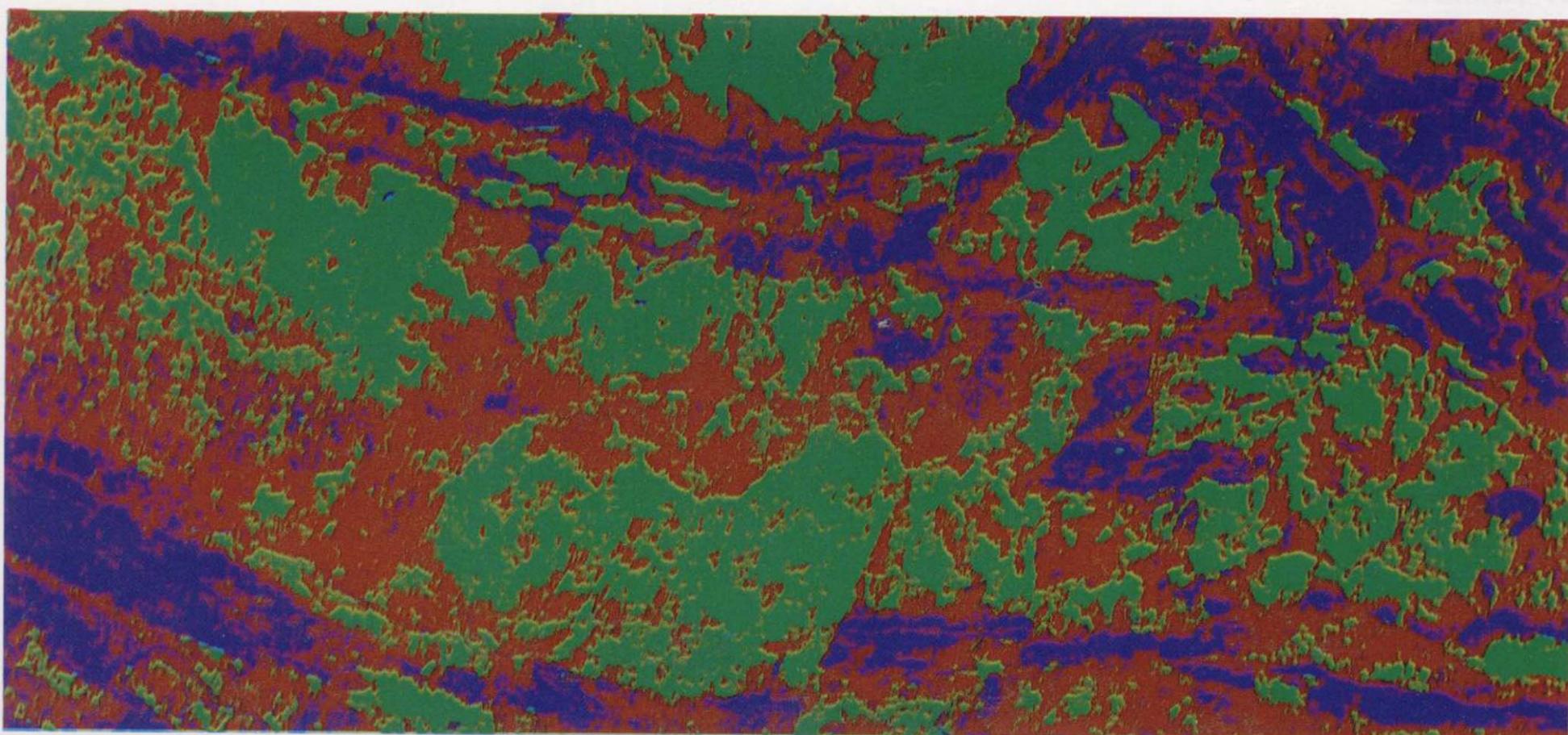
#### LAMINA 9



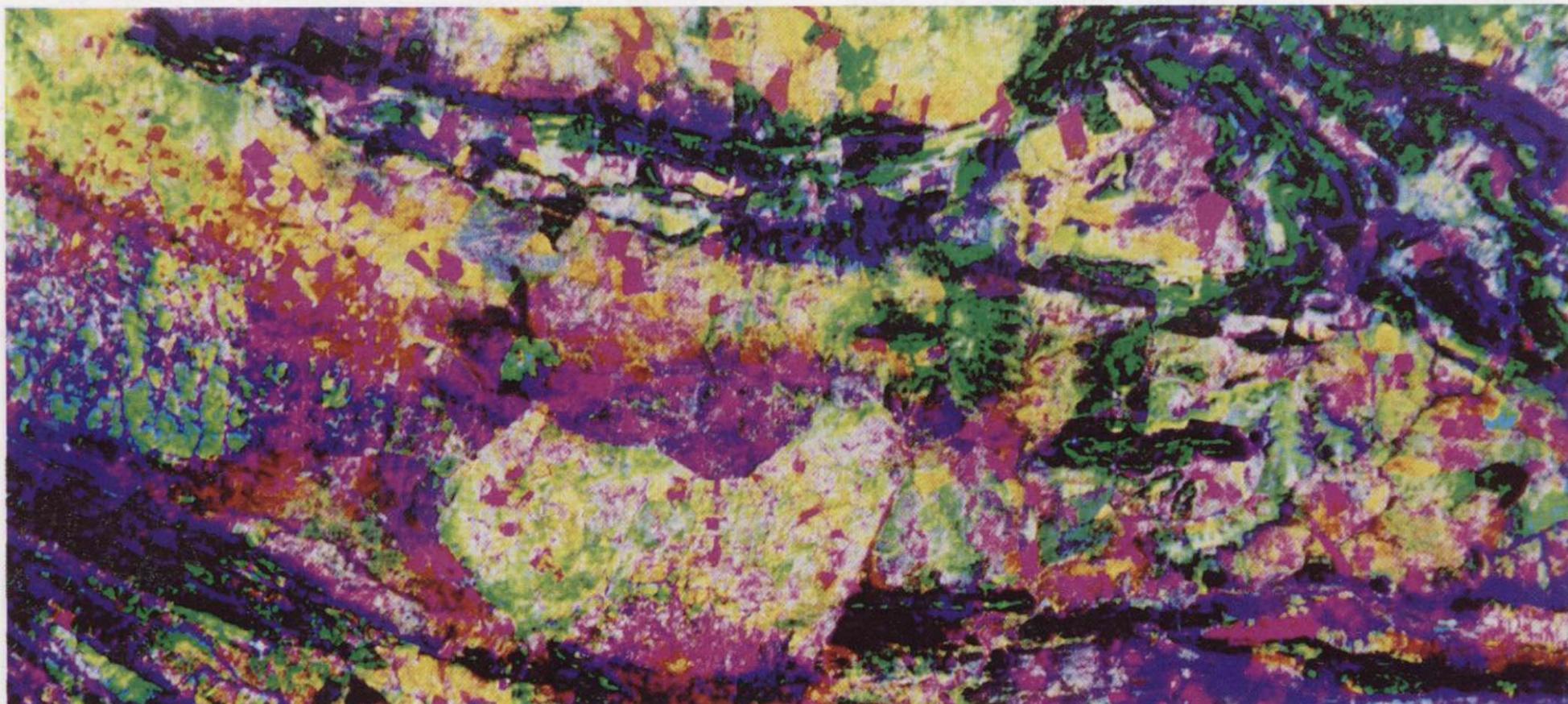
Segmentación de intervalos de números digitales en banda 7 del TM. Azul, valores bajos; rojo, intermedio; verde, altos.



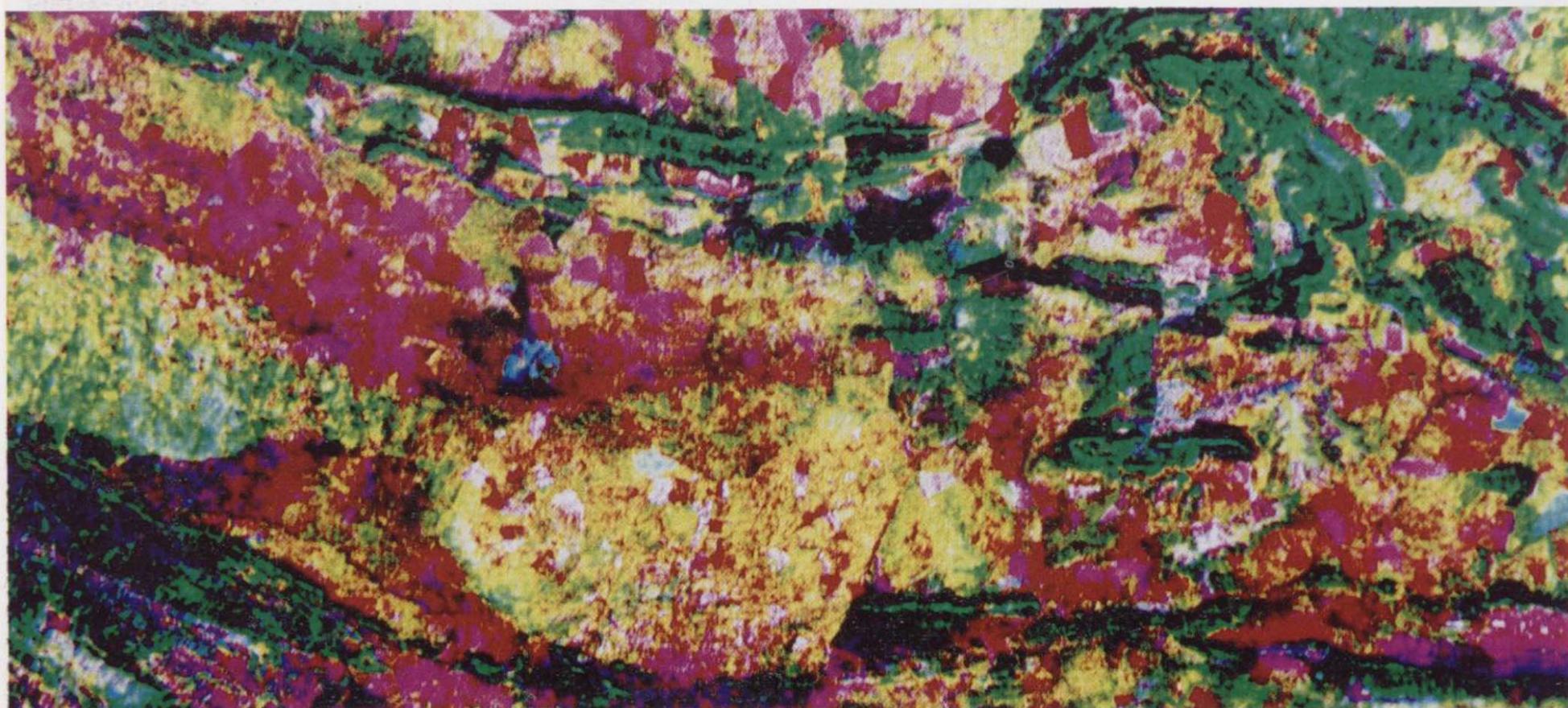
Segmentación de intervalos de números digitales en el cociente 4/3 calculado sobre bandas no modificadas. Azul, valores bajos; rojo, intermedios; verdes, altos.



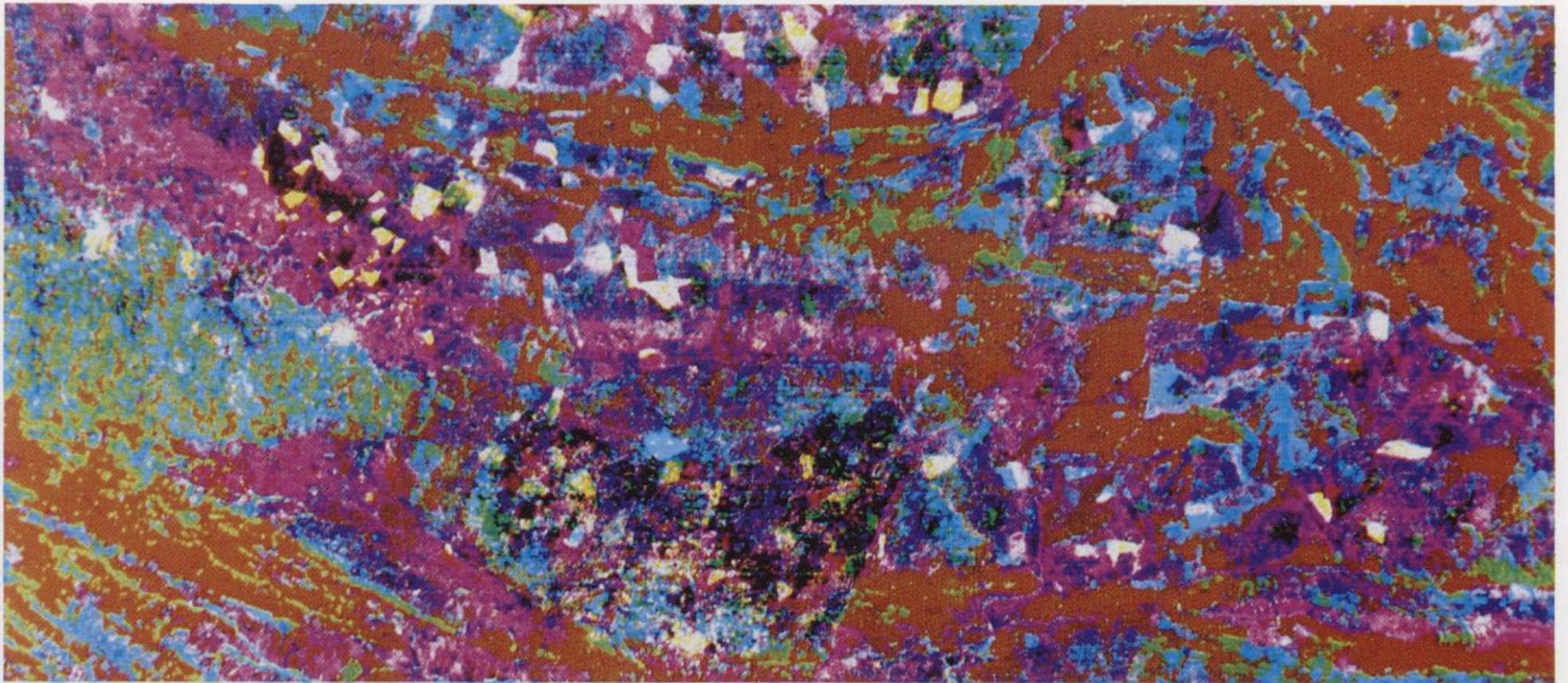
Segmentación de intervalos de números digitales en banda 7 del TM. Azul, valores bajos; rojo, intermedio; verde, altos.



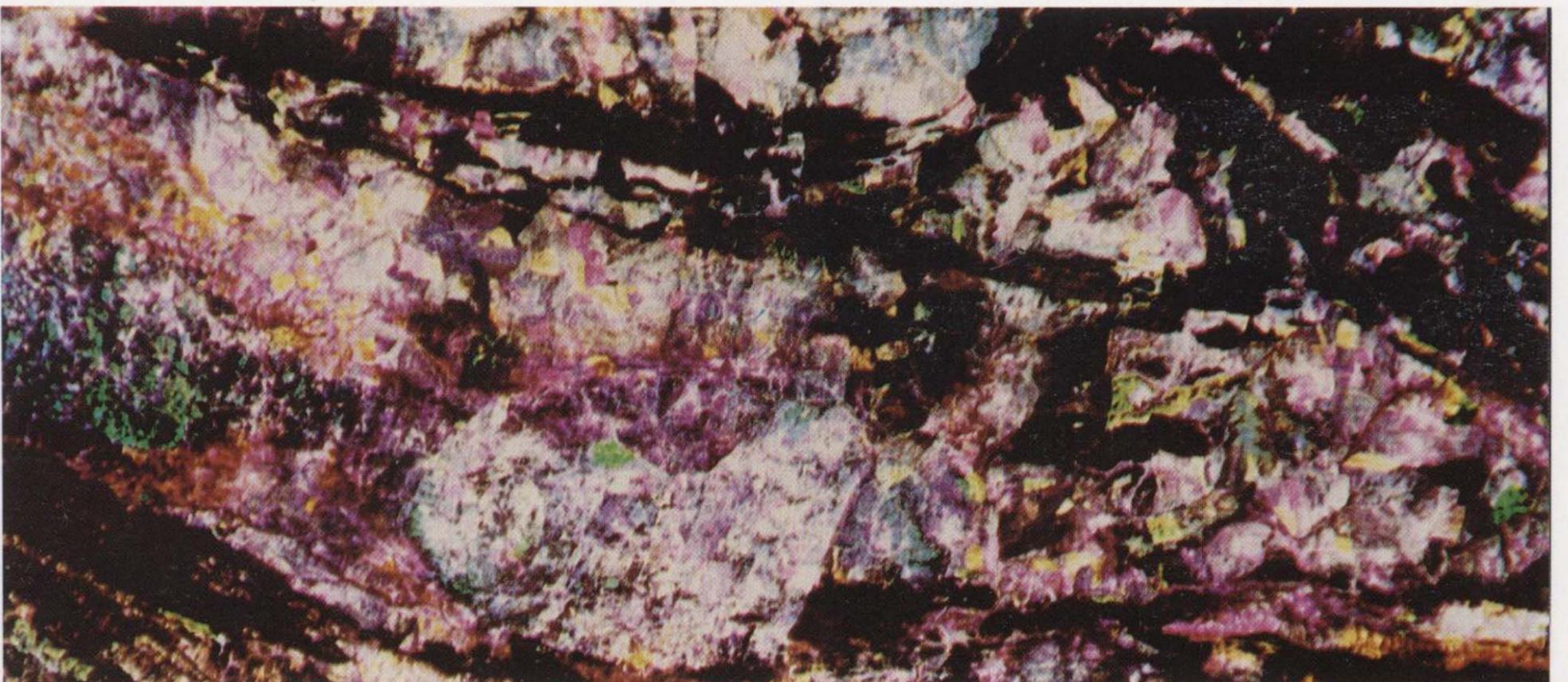
Composición de color de componentes principales de orden tercero (azul), primero (rojo) y segundo (verde) calculadas sobre las seis bandas del Thematic Mapper en el visible e infrarrojo cercano.



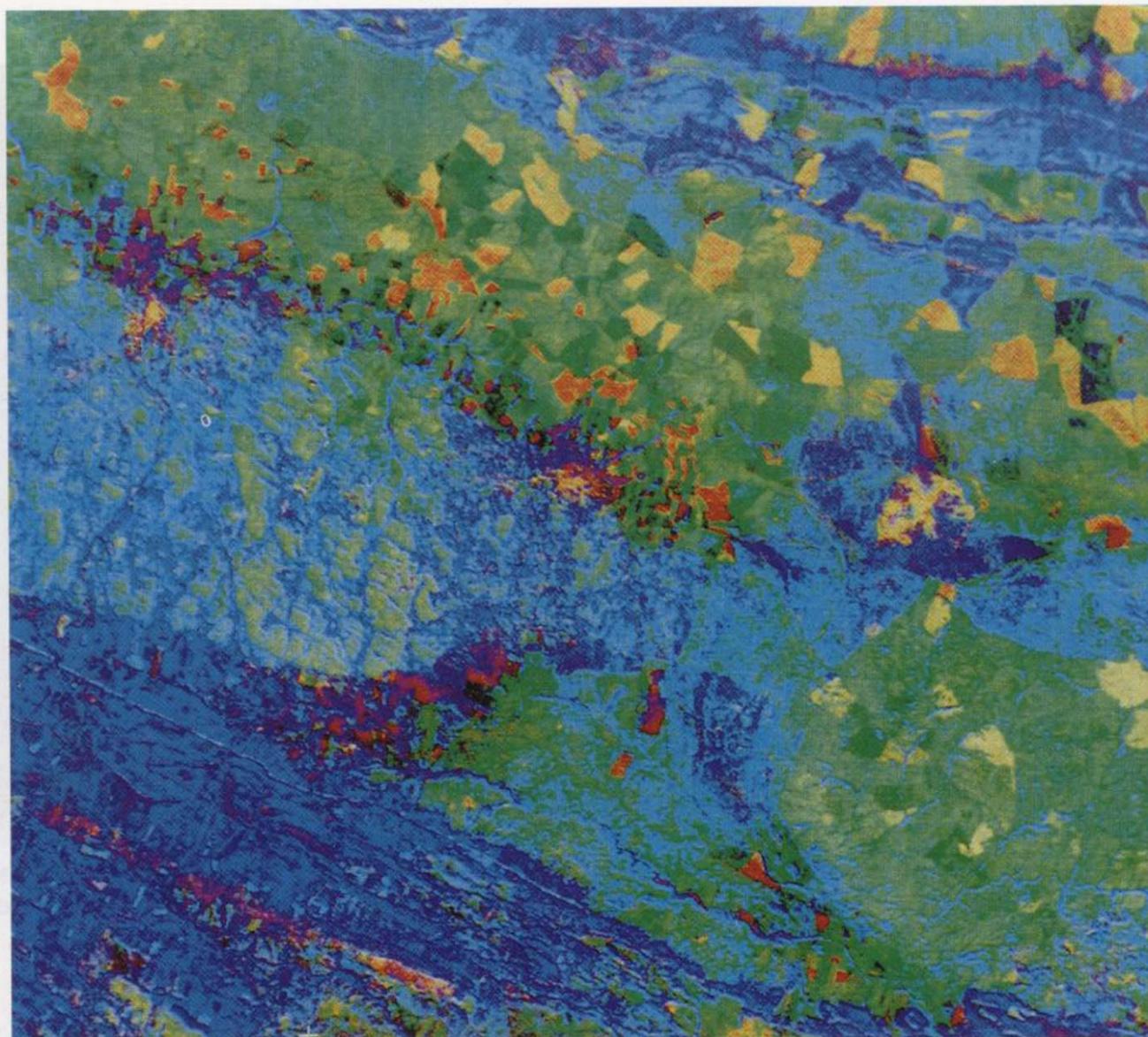
Composición de color de componentes principales de orden tercero (azul), primero (rojo) y segundo (verde) calculadas sobre las bandas 3, 5 y 7 del Thematic Mapper.



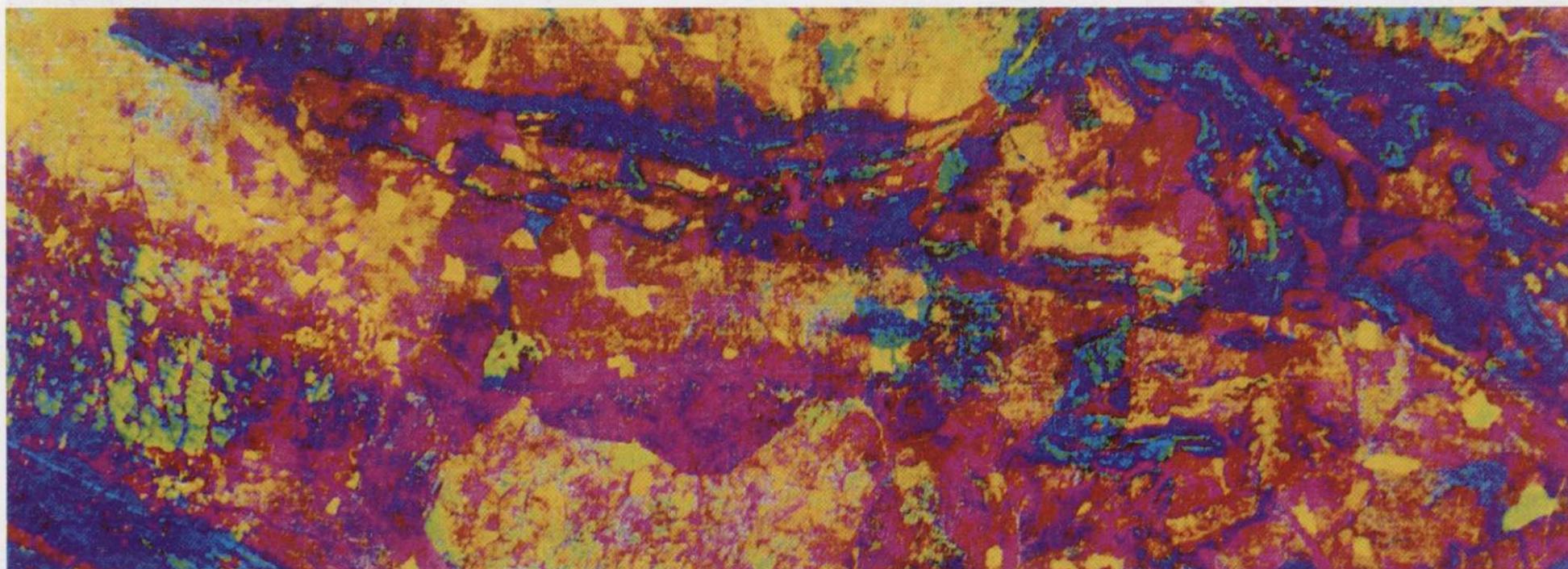
Composición de color de componentes principales de orden cuarto (azul), tercero (rojo) y quinto (verde) calculadas sobre las seis bandas estiradas del Thematic Mapper correspondientes al visible y al infrarrojo cercano.



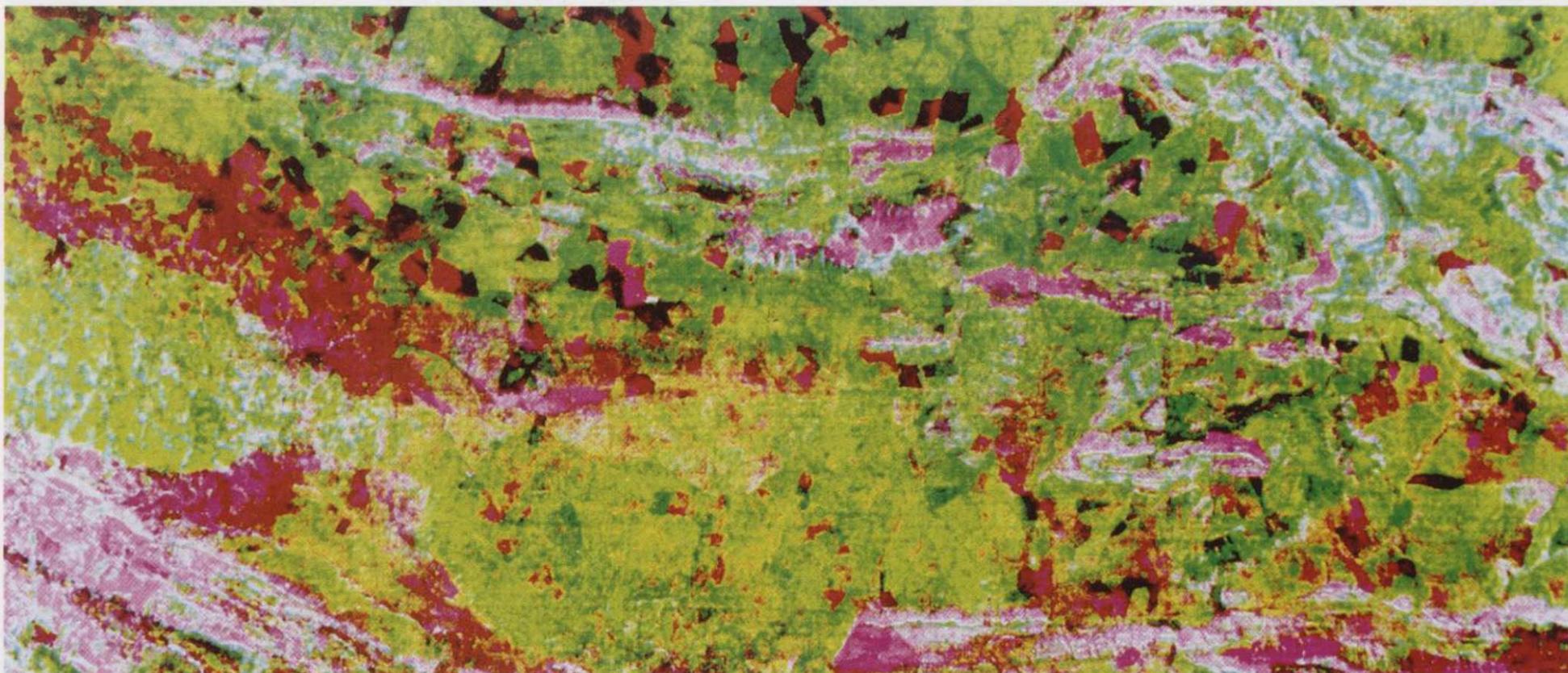
Composición en falso color con las bandas 5 (azul), 3 (rojo) y 7 (verde) iniciales.



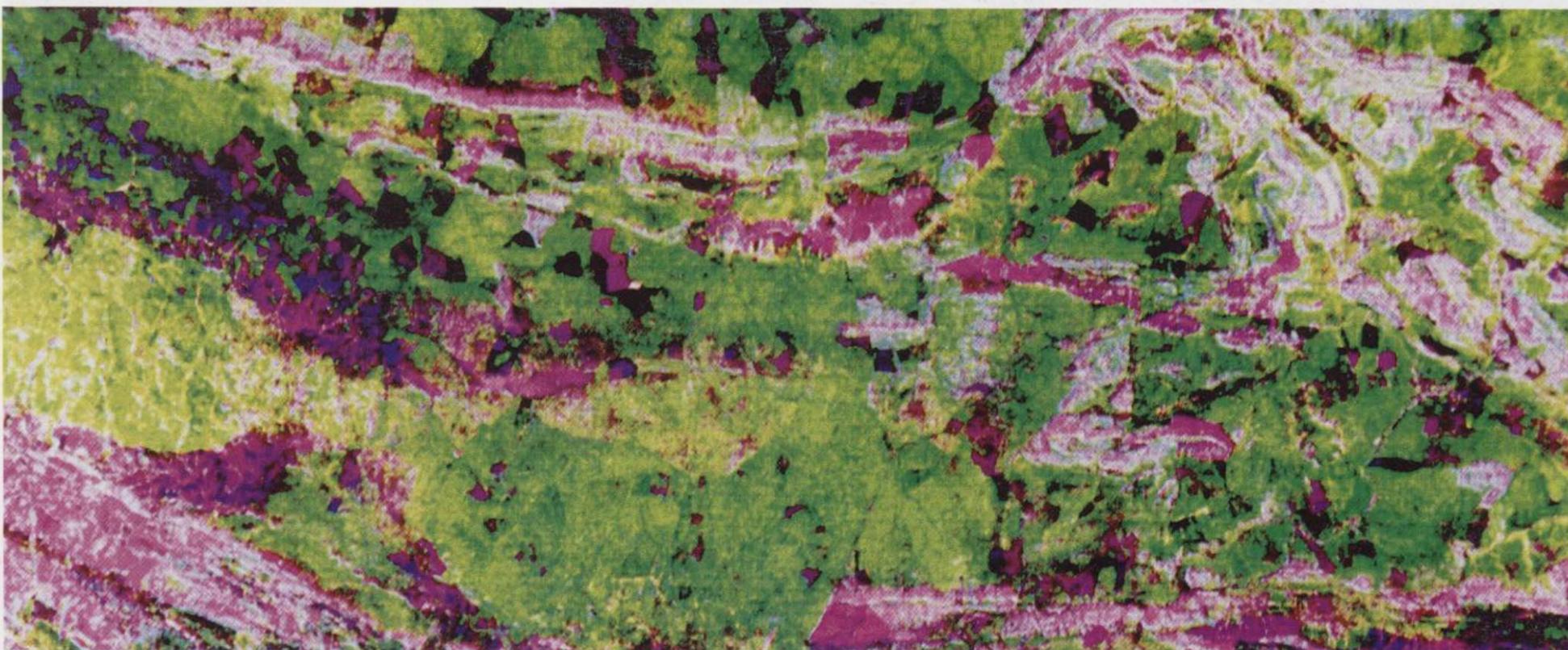
Composición en falso color con los cocientes  $4/3$  (azul),  $5/7$  (rojo) y  $5/4$  (verde) calculados sobre bandas TM iniciales.



Composición en falso color con los cocientes  $5/7$  (azul),  $3/1$  (rojo) y  $2/4$  (verde) calculados sobre bandas TM iniciales.

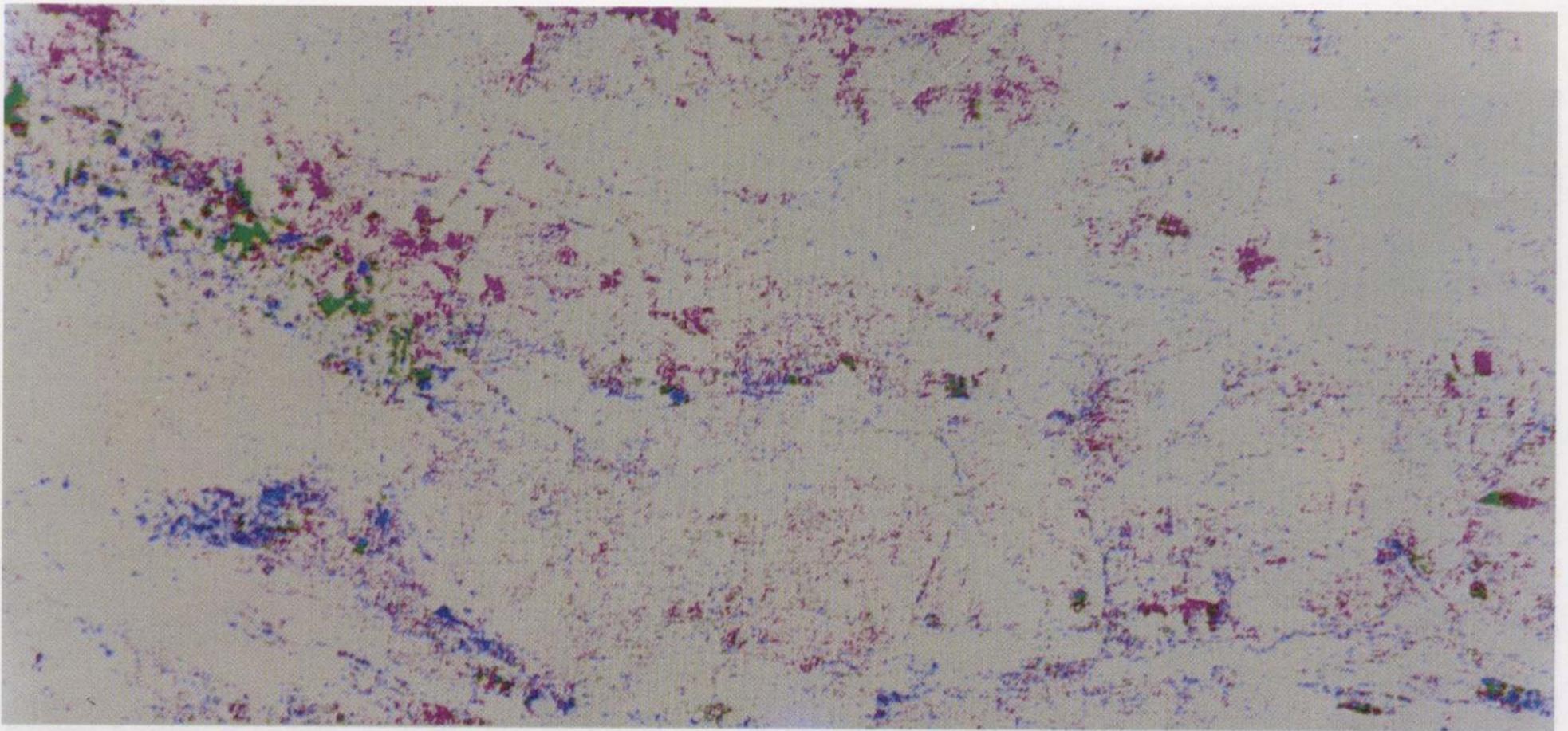


Composición en falso color con los cocientes  $4/7$  (azul),  $3/7$  (rojo) y  $5/3$  (verde) calculados sobre bandas TM iniciales.



Composición en falso color con los cocientes  $2/7$  (azul),  $4/7$  (rojo) y  $5/3$  (verde) calculados sobre bandas TM iniciales.

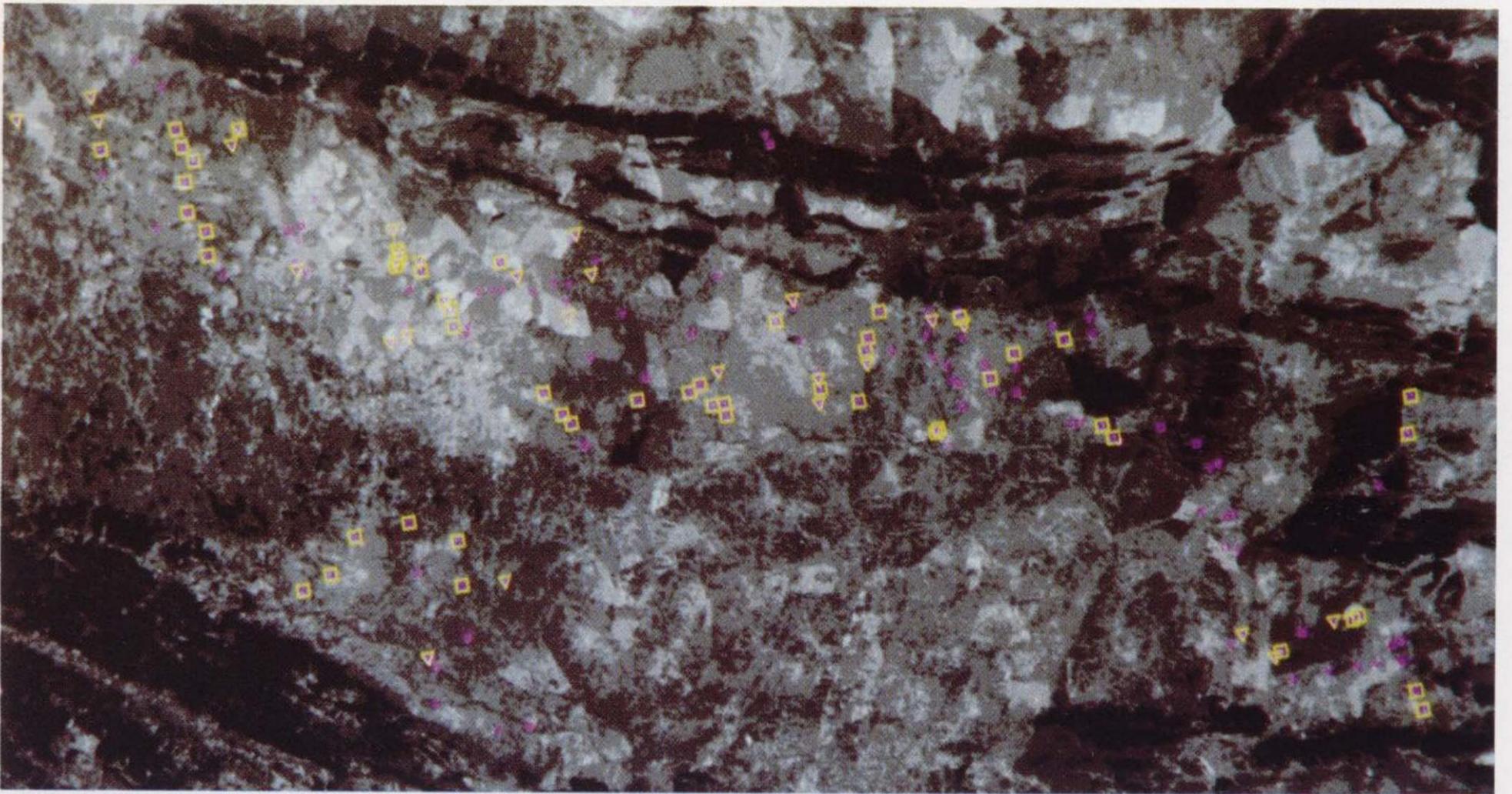
Observaciones microestructurales observadas en láminas delgadas y laminillas superpuestas a una imagen fotográfica de una muestra de roca sedimentaria. Las imágenes fueron tomadas por medio de un microscopio electrónico de transmisión (TEM) en un acelerador de electrones de 100 kV. Los datos fueron procesados con el software de procesamiento de imágenes de la Universidad de Zaragoza.



Segmentación de valores sobre el cociente 2/7 calculado sobre bandas estiradas y enmascarado para densidad alta de vegetación. Azul, valores bajos; magenta, valores intermedios; verde, valores altos.



Observaciones microestructurales observadas en lámina delgada y lineamientos superpuestos a una imagen Thematic Mapper, banda 3, codificadas en color (rojo, pizarras afectadas por metamorfismo térmico; verde, pizarras afectadas por metamorfismo dinámico débil; rosa, puntos de muestreo donde no se observa ninguno de los efectos anteriores).



Muestras en las que se observa desarrollo de esquistosidad de creñulación hercínica tardía subhorizontal (amarillo) superpuestas a una imagen Thematic Mapper, banda 3 (rosa, puntos de muestreo, donde no se observa desarrollo de esta esquistosidad).

cambios significativos en la reflectancia. Se acentúan los rasgos debidos al hierro en el intervalo 0,4-1,3  $\mu\text{m}$ ., desaparecen las absorciones por agua molecular, y la abundancia de arcillas produce mínimos acentuados en 2,2, 2,25, 2,35 y 2,4  $\mu\text{m}$ . por efecto de los aniones OH, así como otra serie de mínimos mitigados en el intervalo 1,8-2,0  $\mu\text{m}$ .

Los efectos de procesos de metamorfismo dinámico débil se manifiestan preferentemente en pelitas y grauvacas oscuras, sólo detectables en reflectancia observada en secciones de roca cortadas por sierra. La reducción en reflectancia global, y menor pendiente de la caída hacia el azul en el visible observada en las zonas afectadas por una intensidad ligeramente mayor de deformación, apuntan a cambios cuantitativos o cualitativos en la materia orgánica contenida en las rocas. La reflectancia observada en suelos confirma la misma tendencia.

El Complejo esquisto-grauváquico muestra valores de reflectancia altos en todas las bandas del Thematic Mapper, que se han sometido a estiramientos para mejorar la capacidad de expresión visual de diferencias espectrales en el mismo.

El análisis de correlación y la comparación de distintas composiciones en falso color, indican las bandas 3, 5 y 7 como más variadas, con especial mención de la banda 3 en los cambios de reflectancia relacionados con la influencia de metamorfismo térmico producido por la intrusión de granitos.

El predecible aumento de reflectancia global desde zonas próximas al contacto con el granito hacia áreas más alejadas se cumple al comparar las regiones más inmediatas a dicho contacto con las restantes. A distancias mayores, se observan relaciones contrarias en el visible y el infrarrojo, tanto en las imágenes originales como en las estiradas.

Los cocientes de bandas con distribuciones bidimensionales más representativas de diferencias en metamorfismo térmico son los 3/7, 2/7 y 5/3. Los cocientes calculados sobre bandas estiradas no mejoran la expresión visual de las diferencias observadas, por causas achacables al aspecto ruidoso de un estiramiento excesivo, y a las características de los soportes físico y lógico utilizados.

El cociente 2/7 calculado sobre bandas estiradas presenta la distribución más amplia de números digitales a lo largo del rango completo de su histograma de frecuencias en relación a zonas con distinta intensidad de metamorfismo térmico.

Los efectos del metamorfismo dinámico débil se manifiestan en una reducción de la reflectancia global. Estos efectos son más evidentes cuando se superponen a materiales que han experimentado un metamorfismo térmico débil, que también produce una disminución de la reflectancia global. La intensificación de la deformación parece tener más influencia en la reflectancia de los materiales más oscuros inicialmente. En las rocas sedimentarias sometidas a distintos procesos metamórficos que afloran en el área de estudio, es el contenido en materia orgánica o transformaciones producidas en la misma por los mencionados procesos el responsable de cambios en reflectancia.

Una apreciación más cuidadosa de los efectos de aumentos en temperatura y presión sobre los cambios mineralógicos, cristalográficos y texturales en rocas ricas en materia orgánica, así como en los suelos que se desarrollan sobre ellas, es un campo de investigación actualmente abierto.

Las observaciones microestructurales representadas por medio de un sistema de información geográfico confirman la extensión de la influencia del metamorfismo de contacto desarrollado por la intrusión de granitos en las áreas mostradas en las imágenes Thematic Mapper.

De igual modo, la manipulación por medio de codificaciones de color para ángulos de buzamiento en superficies y lineaciones ha permitido analizar con detalle los datos estructurales tomados en el campo.

La extensión de las aureolas de metamorfismo y la relativa inmovilidad de las estructuras en el encajante confirma un emplazamiento intrusivo por stopping y subsidencia caudron supuesto para los granitos tardíos en el Macizo Hespérico. Ligeras diferencias en la disposición de las estructuras en el encajante, y en la distribución de fracturas observadas en imágenes, sugieren que el granito de Nisa-Albuquerque se compone de dos unidades emplazadas sucesivamente en el tiempo.

Con posterioridad al emplazamiento de granitos, o en sus últimas etapas, se forma una esquistosidad de crenulación subhorizontal que se dispone como un envolvente respecto a los mismos. Los planos de las superficies de esquistosidad se disponen perpendicularmente a las paredes de los granitos.

El conjunto de los elementos estructurales atribuibles a la deformación hercínica principal en el Complejo esquistograuváquico giran desde una disposición NO-SE al oeste hasta situarse E-O al este del área de estudio. Esto puede atribuirse al efecto combinado de desplazamientos levógiros horizontales de la Zona de Cizalla Porto-Badajoz-Córdoba postcámblica, y la fracturación tardihercínica en dirección NE-SO. Las fracturas tardihercínicas compartimentan el área en dominios reflejados en imágenes, y en los lineamientos cartografiados sobre ellas, en los cuales se observa un cambio progresivo en la dirección de las estructuras.

Las microestructuras observadas en pelitas, y el desarrollo de distribuciones bimodales en las posiciones de las estructuras hercínicas sugieren la existencia de una zona de cizalla poco intensa en una franja de unos 3 km. de anchura, que atraviesa el granito de Nisa-Alburquerque, coincidiendo con un estrangulamiento en el mismo paralela a la dirección de la Falla de Alentejo-Plasencia.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible en el marco de un proyecto financiado por la Comisión de las Comunidades Europeas, en su dirección de recursos no renovables, en el que han cooperado diversas instituciones españolas, portuguesas y británicas. Los estudios espectrales se han realizado gracias a una beca del Programa de Formación de Doctores y Tecnólogos del Ministerio de Educación y Ciencia, que ha financiado una estancia de un año de duración en el United States Geological Survey (Reston, Virginia, Estados Unidos). El Instituto Tecnológico Geomínero de España ha sido la casa materna de todos y cada uno de los pasos recorridos.

La idea de trabajar con especial dedicación en los problemas cartográficos del Complejo esquistograuváquico no habría surgido sin un frustrado

trabajo anterior que se desarrolló durante varios años en un contexto parecido, y que sirvió de formación en las técnicas de interpretación de imágenes, tanto visuales como digitales. Tampoco habría surgido sin conversaciones casuales con E. Ortega, y otros geólogos del grupo de Minas de Almadén, que iniciaron su andadura en el estudio de imágenes a la vez que la autora. Ni hubiera tomado cuerpo de línea de trabajo dentro del equipo integrador del proyecto que le sirvió de marco sin el apoyo, e inestimables primeros comentarios de D. Sanderson.

J. L. García Casquero, V. Monteserín, F. López y E. Ortega proporcionaron información valiosísima sobre los métodos de trabajo en el campo, y D. Sanderson fue consejero insustituible en las primeras salidas. F. Bellido, L. A. Cueto y C. Quesada hicieron numerosos y documentados comentarios durante el estudio de láminas delgadas.

De modo muy especial, F. Pérez Cerdán puso a punto y modificó el programa disponible de información geográfica para representar y modificar símbolos de datos estructurales en pantalla. También se hizo cargo de la puesta a punto de la impresión en plotter de los mismos símbolos. Sin su ayuda el capítulo de análisis interactivo de bases de datos estructurales no existiría.

P. García Santiago ha sido constante asesor en el uso del sistema de información geográfico, y de numerosos programas para ordenador personal, desde procesadores de textos, elaboradores de gráficos calculadores de estadísticas, a base de datos bibliográficas. J. Serrano fue un receptor paciente de todo tipo de consultas descaminadas durante la etapa de puesta a punto del sistema de tratamiento de imágenes.

L. Rowan me abrió las puertas del USGS, en una etapa en que la escasez de personal y de presupuestos en su grupo de trabajo no aconsejaban la admisión de huéspedes extraños al funcionamiento de la casa. Sus sabias observaciones sobre mis innumerables medidas espectrales y su tolerancia respecto a ideas de neófita en la interpretación de características espectrales en minerales y rocas hizo avanzar muy rápidamente la capacidad de criterio en una disciplina hasta entonces sólo conocida por mí a través de la literatura.

Los pequeños desajustes en el uso del ya renqueante espectrómetro siempre encontraron un arreglo pronto en J. Crowley, cuya larga pericia en el manejo del instrumento y en la escritura de programas elaboradores de datos espectrales siempre fue fácil de reclamar. Por no dejar de añadir los mil trucos de acceso a múltiples servicios de uso común de los que no hubiera tenido noticias sin su buena disposición.

J. Duval y F. Riggles hicieron honor a su labor de mantenimiento de la sala de ordenadores, prestando oídos a todos los comentarios triviales sobre pequeñas distorsiones en el uso de programas ya conocidos con versiones y máquinas ligeramente diferentes. Su tolerancia en la ocupación durante meses de un espacio considerable de memoria en un disco siempre atiborrado me permitió trabajar con una libertad de movimientos inapreciable.

Uzi Vulkan, cohabitante del antiguo laboratorio de J. Salisbury en un mundo lejano a nuestros afectos y costumbres, escribió rutinas de cálculos algebraicos sencillos necesarios para la interpretación de medidas espectrales, que sin su ayuda habrían significado mucho más esfuerzo.

Ch. Trautwein, entrañable tutor de un curso trepidante en EROS Data Center, introdujo los métodos de interpretación de bases de datos geológicas con el mismo talante pionero de sus muchos años de exploración en tierras árticas.

E. Ortega hizo una paciente labor crítica del texto final, que no conocería la forma actual, sin su contribución. También V. Crespo corrigió con cariño expresiones, y alentó en todo momento la realización de un trabajo cuyos objetivos y planteamiento eran ajenos a sus métodos.

Alfonso Ubanell se prestó generosamente a avalar la presentación de este trabajo como tesis doctoral, aceptando y confiando desde el principio en mi autonomía para realizarlo. Sus comentarios han sido muy valiosos para hacerlo más comprensible. Carmen Antón-Pacheco, iniciadora del trabajo en teledetección en el centro anfitrión del mismo, ha sido un telón de fondo, en el que acuerdos y desacuerdos no han dejado de jalonar las distintas etapas que su curso ha recorrido.

No menor papel han jugado S. Roberts, C. Chinn, J. McGowan, S. Dee, J. L. Reyes y R. Avilés, con

quienes he compartido tantas veladas de días de campo, a las que no han sido ajenas Paco y Lidia, nuestros anfitriones en La Codosera.

R. Thomas, M. Crutchley y Tea, con su hospitalidad hogareña, hicieron que me sintiera en casa durante varias estaciones del año cuando había todo un océano en medio. Lisa Martín facilitó la entrada en otro país con las cosas más sencillas y necesarias: visado, alojamiento y trámites bancarios.

J. Vallejo y J. A. Heras delinearon todos y cada uno de los gráficos y figuras, aceptando modificaciones y cambios de tamaño pacientemente. R. Martínez compuso el texto, y Goyo hizo todas las copias definitivas de láminas y fotografías.

Mercedes me ofreció su casa al partir para un largo viaje de retorno incierto, proporcionándome un rincón cálido y tranquilo en el que desgranar todas las páginas que preceden.

Por último, agradezco a mi familia y amigos que no hayan dejado de sonreír al oír el tan repetido «cuando haya leído la tesis», con el que se han pospuesto tantos planes.

#### REFERENCIAS

ANTON-PACHECO, C. (1989): *Cartografía digital de rocas en el área de Alburquerque-La Codosera, Extremadura, utilizando imágenes Landsat Thematic Mapper*. Res. III Reunión Científica del Gr. de Trab. en Teledetección, octubre de 1989, Madrid, 157-168.

ARTHAUD, F., y MATTE, Ph. (1975): *Les Décrochements tardi-hercyniens du Sud-Ouest de l'Europe. Géométrie et essai de reconstitution des conditions de la déformation*. Tectonophysics, 25, 139-171.

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*. Jr. of Geophys. Res., 88, núm. B12, Dec. 10, 1983, 10635-10644.

CONDIT, Ch. D., y CHAVEZ, P., Jr. (1979): *Basic Concepts of Computerized Digital Image Processing for Geologists*. USGS Publications, Geol. Surv. Bull., 1462.

CROWLEY, J. K. (1986): *Visible and Near-Infrared Spectra of Carbonate Rocks: Reflectance Variations Related to Petrographic Texture and Impurities*. Jr. of Geophysical Res., 91, núm. B5, Apr. 10, 5001-5012.

CROWLEY, J. K.; SHERMAN, D. M., y BENNET, I. S. (1986): *A low-cost digital recording and display system for Beck-*

man UV 5200 series spectrophotometers. US Geol. Surv. Open-File Report, 86-27, 23 pp.

DRURY, S. A. (1987): *Image Interpretation in Geology*. Allen & Unwin, 243 pp.

ELVIDGE, Ch. D., y LYON, J. P. (1985): *Influence of Rock-Soil Spectral Variation on the Assessment of Green Biomass*. Rem. Sens. of Environ., 17, 265-279.

ESCADAFAL, R.; GIRARD, M.-C., y COURAULT, D. (1989): *Munsell Soil Color and Soil Reflectance in the Visible Spectral Bands of Landsat MSS and TM Data*. Remote Sensing of Environment, 27, 37-46.

ETHERIDGE, M. A., y LEE, M. F. (1975): *Microstructure of Slate from Lady Loretta, Queensland, Australia*. Geol. Soc. of Am. Bull., 86, 13-22.

GREGG, W. J. (1985): *Microscopic deformation mechanisms associated with mica film formation in cleaved psammitic rocks*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 1, 45-56.

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.

JENSEN, J. R. (1986): *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. Prentice Hall, 379 pp.

KAUFMANN, H. (1987): *Mineral Exploration along the Aqaba-Levante Structure-Concepts, Processing, Results*. Proc. European Remote Sensing Needs in the 1990s. Noordwijkerhout (Nederlanden), 4-8, May 1987.

KNIPE, R. J. (1981): *The interaction of deformation and metamorphism in slates*. Tectonophysics, 78, 249-272.

KNIPLING, E. B. (1969): *Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation*. Proc. Sympos. on Information Processing, 28-30 Apr. 1969.

LEFORT, J. P., y RIBEIRO, A. (1980): *La faille de Porto-Badajoz-Cordue a-t-elle contrôlé l'évolution de l'océan paléozoïque sud-armoricain?* Bull. Soc. Geol. France, 1980 (7), t. XXII, núm. 3, 455-462.

LOPEZ PLAZA, M., y MARTINEZ CATALAN, J. R. (1988): *Síntesis estructural de los granitoides hercínicos del Macizo Hespérico*, en BEA, CARNICERO, GONZALO, LOPEZ PLAZA, RODRIGUEZ ALONSO (Eds.) (1988): *Geología de los granitoides y rocas asociadas del Macizo Hespérico*. Rueda, 542 pp.

MARTIN-SERRANO, A. (1986): *El relieve de la región occidental zamorana. Un modelo de evolución geomorfológica del borde hespérico*. Tesis doctoral. Univ. Complutense de Madrid (in litt.).

MUNSELL COLOR CO. (1950, revisado en 1975): *Munsell Soil Color Charts, Munsell Color, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation*. Baltimore, MD.

OEN ING SOEN (1970): *Granite intrusion, folding and me-*

*tamorphism in central northern Portugal*. Bol. Geol. y Min., t. LXXXI, 2-3, 271-298.

PARGA, J. R. (1969): *Sistemas de fracturas tardihercínicas del Macizo Hespérico*. Trab. Lab. Geológico de Laxe, número 37, 15 pp.

PEREZ CERDAN, F., y OROZCO CUENCA, T. (1990): *Plotting Grass vector maps in a DOS/PC*. European Grass News, núm. 1, Nov. 1990, Bureau Nieuwland, Wageningen, The Netherlands, 4 pp.

PITCHER, W. S., y BERGER, A. R. (1972): *The Geology of Donegal. A Study of Granite Emplacement and Unroofing*. John Wiley & Sons., Inc., 435 pp.

PODWYSOCKI, 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.

POWELL, C. McA.; COLE, J. P., y CUDAHY, T. J. (1985): *Megakinking in the Lachland Fold Belt, Australia*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 3/4, 281-300.

RIAZA, M. A., y BEL-LAN, A. (1986): *Evaluación de una técnica de tratamiento digital de imágenes. Aplicación del análisis de componentes principales a una imagen TM en un área granítica del Macizo Hespérico Central*. Bol. Geol. y Min., t. 98, f. 4, julio-agosto 1987, 25-37.

ROWAN, L. C.; WETLAUFER, P. H.; GOETZ, A. F. H.; BIL-LINGSLEY, F. C., y STEWART, J. H. (1976): *Discrimination of Rock Types and Detection of Hydrothermally Altered Areas in South-Central Nevada by the Use of Computer-Enhanced ERTS Images*. US Geol. Surv. Prof. Paper, 883, 36 pp.

ROWAN, L. C.; ANTON-PACHECO, C.; BRICKEY, D. W.; KINGSTON, M. J.; PAYAS, A.; VERGO, N., y CROWLEY, J. K. (1987): *Digital classification of contact metamorphic rocks in Extremadura, Spain using Landsat Thematic Mapper data*. Geophysics, 52, núm. 7 (Jul. 87), 885-897.

SANDERSON, D. J. (1990): In: *Development of new multidisciplinary techniques for mineral exploration in several areas of the western iberian peninsula*. Informe final contr. núm. MA1M-0032-C(A), Comisión de las Com. Eur., Dir. Gen. for Sci., Res. and Develop., Dir. G., Raw Mat. and Adv. Mat.

SCHOWENGERDT, R. A. (1983): *Techniques for Image Processing and Classification in Remote Sensing*. Academic Press, 247 pp.

SIDDANS, A. W. B. (1972): *Slaty Cleavage - A Review of reseach since 1815*. Earth Science Reviews, 205-232.

WILLIAMS, P. F. (1972): *Development of metamorphic layering and cleavage in low grade metamorphic rocks at Bermagui, Australia*. Am. Jr. of Science, 272, Jan. 1972, 1-47.

WILLIAMS, P. S. (1985): *Multiply deformed terrains-problems of correlation*. Jr. of Struct. Geol., 7, núm. 3/4, 264-280.

## G L O S A R I O

Los términos de este glosario se definen en cuanto a su uso en tratamiento digital de imágenes y teledetección. Las definiciones son, por tanto, incompletas, y existen otros significados para los términos que se mencionan. La mayor parte de las definiciones proceden de BURROUGHS, 1986; CONDIT y CHAVEZ, 1979, y SABINS, 1978.

albedo: cociente entre la energía radiante total devuelta por un cuerpo y la energía solar radiante incidente en el mismo.

ángulo de depresión: en radar, ángulo entre el plano horizontal imaginario que pasa por la antena y la recta que conecta la antena y el punto de observación.

ángulo de iluminación solar: altitud del sol, medida en grados de distancia angular desde el horizonte desde la posición del observador. También denominado elevación solar, ángulo solar, o ángulo de iluminación. Por extensión, se utiliza el término ángulo de iluminación al referirse a sensores activos, en los que el mismo sensor posee una fuente de iluminación.

banda de absorción: intervalo de longitudes de onda entre los que se absorbe radiación electromagnética por cualquier sustancia.

banda espectral: parte preseleccionada del espectro electromagnético.

base de datos: conjunto de información interrelacionada, almacenada de algún modo en disco o cinta magnética. La base de datos de un sistema de información geográfico incluye información sobre la posición geográfica de los elementos que contiene, que se han codificado como puntos, líneas, áreas, píxeles o redes de celdas.

base de datos relacional: métodos de estructuración de datos en forma de series de registros o tuples de modo que las relaciones entre distintas entidades y atributos puedan utilizarse para el acceso y la transformación de datos.

base de datos jerárquica: método de organizar ficheros en cualquier serie de datos de modo que el acceso y modificación de los mismos sólo sea posible a través de una trayectoria jerarquizada piramidal predefinida.

calibrado: proceso de comparación de las medidas de un instrumento con un standard.

canal: intervalo de longitudes de onda en el espectro de energía electromagnética. En una imagen, los intervalos de longitudes de onda en los que el sensor adquiere imágenes. También denominado banda.

cociente de bandas: proceso consistente en dividir cada píxel de una imagen (o banda) por el píxel correspondiente de otra imagen (o banda).

composición de color: imagen en la que se combinan otras tres cuya reflectancia está expresada en valores de gris, asignándoles a cada una un color (rojo, verde o azul), de modo que los valores de reflectancia se expresan como saturación de tono. Al combinar las tres imágenes monocromas se obtiene una imagen policroma.

correcciones geométricas: tratamientos digitales para corregir distorsiones en la relación espacial de los elementos de una imagen.

componentes principales: cálculo estadístico aplicable a imágenes multispectrales basado en estimaciones de varianza máxima.

dispersión atmosférica: cambio en la dirección de propagación, frecuencia o polarización de la energía electromagnética por interacción con las partículas atmosféricas. También llamada niebla.

energía electromagnética: energía propagada en forma de interacción entre los campos eléctrico y magnético. La energía electromagnética se mueve a la velocidad de la luz.

emisión: proceso por el que un cuerpo irradia energía electromagnética. Determinable por la temperatura cinética y la emisividad.

espectro electromagnético: secuencia continua de energía electromagnética dispuesta según su longitud de onda o frecuencia.

espectrómetro: aparato que mide la intensidad de radiación absorbida o reflejada por un material en función de la longitud de onda.

estiramiento: técnica digital que permite al usuario cambiar el contraste de una imagen aumentando o disminuyendo el intervalo de valores de los números digitales.

estiramiento por sectores: estiramiento en el que se aplican coeficientes de expansión diferentes a distintos intervalos de números digitales en el histograma de frecuencias de una imagen.

falso color: ver composición de color.

filtro digital: técnica que permite al usuario realzar detalles (filtro de paso alto) o formas a gran escala (filtro de paso bajo).

frecuencia: número de vibraciones por unidad de tiempo, o número de longitudes de onda por unidad de tiempo que pasan por un punto. En estadística, número de veces que se repite un determinado suceso.

HRRR (Hand Held Ratioing Radiometer): radiómetro de campo que calcula cocientes entre los canales en los que registra energía.

histograma de frecuencia: tabla que resume el número de elementos unidad (píxeles) que tienen un valor de gris dado o número digital (DN) en una imagen.

infrarrojo cercano (NIR): región infrarroja del espectro de energía electromagnética entre longitudes de onda de 0.7 µm. a 2.5 µm.

infrarrojo térmico (TIR): región del espectro de energía electromagnética entre 3 y 14 µm. que se emplea en teledetección. Esta región recorre el pico de energía radiante de la tierra.

imagen digital: serie de valores integrados positivos en dos dimensiones que corresponden a valores discretos de

reflectancia espectral que reproducen el aspecto visual de un área determinada.

imagen multiespectral: imágenes tomadas por un sensor en varios canales.

longitud de onda: distancia entre dos puntos consecutivos que se encuentran en el mismo estado vibratorio en una onda armónica.

máscara: tratamiento digital que consiste en convertir en ceros, visualizables en negro, parte de los números digitales de una imagen.

modelo digital de elevación del terreno (DEM): modelo cuantitativo de las formas del terreno en forma digital. También, digital terrain model (DTM).

número digital (DN): valor integrado relacionado con la luminosidad (o intensidad de la radiación) de un área determinada en una imagen. Para los datos que proporcionan los satélites Landsat y Spot, este valor está comprendido entre 0 y 255.

pixel (picture element): representación digital de la radiación electromagnética del área mínima medida por un detector.

radar: acrónimo de radio detection and ranging, forma de teledetección activa que opera en los intervalos de longitud de onda de las microondas y las ondas de radio.

radiómetro: aparato que mide cuantitativamente energía radiante.

raster: red regular de celdas que cubren un área.

reflectancia espectral: relación entre la energía reflejada y la energía incidente sobre una superficie por unidad de área (para una determinada longitud de onda).

reflectancia difusa: medida de la reflectancia de una superficie en la que la radiación incidente se refleja de modo uniforme en todas direcciones.

registro: proceso de superponer dos o más imágenes o fotografías de modo que coincidan puntos geográficos equivalentes.

relación: cada una de las capas de datos de una base de datos relacional.

resolución espacial: estimación de la separabilidad de dos objetos en una imagen o fotografía. Normalmente se expresa como la menor distancia entre dos pares de líneas por unidad de distancia capaces de distinguirse una de otra.

ruido: valores espúneos de reflectancia espectral que no provienen del objetivo, sino del detector o los sistemas de registro digital, transmisión, recepción y reducción de datos.

segmentación: asignación de distintos colores a diferentes intervalos de números digitales en el histograma de frecuencias.

sensor: aparato que recibe energía electromagnética y lo convierte en una señal susceptible de ser registrada y mostrada en datos numéricos o como una imagen.

sensor activo: sensor que posee una fuente propia de radiación

electromagnética que ilumina el terreno. El ejemplo más conocido es el radar.

sensor pasivo: sensores que recogen energía reflejada o emitida naturalmente por una superficie.

SAR (Synthetic Aperture Radar): sistema de radar en el que se consigue una gran resolución de azimut (orientación geográfica respecto al norte) a base de un tratamiento de datos del efecto Doppler de pulsos de retorno múltiples que proporciona el efecto de una antena de mayores dimensiones.

señal: información recogida por un sistema de detección a distancia.

SLAR (Side-looking Airborne Radar): Sistema de barrido lateral aeroportado que adquiere imágenes de radar.

sistema de información geográfico (GIS): soporte físico y lógico que permite la elaboración de bases de datos con información sobre su posición geográfica, y permite modificaciones en función de la misma.

sistema digital productor de imágenes: conjunto de instrumentos que miden la radiación reflejada por una superficie y que transforman su intensidad en una señal electrónica que se registra como un valor digital sobre una escala predeterminada. Si el sistema es activo, lleva incorporado un emisor de radiación que se reflejará en la superficie a medir.

SMIRR (Shuttle Multispectral Infrared Radiometer): sensor aeroportado pasivo que opera en el visible e infrarrojo cercano.

SPOT (Système Probatoire d'Observation de la Terre): satélite francés de órbita sinmeridiana equipado con un sensor productor de imágenes en el visible.

SOYUZ: serie de satélites productores de imágenes puestos en órbita por la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas.

textura: frecuencia de cambios y disposición de tonos en una imagen.

TM (Thematic Mapper): Barredor multiespectral portado por los satélites Landsat que registra imágenes en siete canales en el visible, infrarrojo cercano y térmico.

tratamiento digital de imágenes: manipulación por ordenador de los valores de los números digitales de una imagen.

tratamiento interactivo: método de tratamiento de imágenes en el que el operador visualiza resultados provisionales y modifica las instrucciones en el ordenador para conseguir otros productos.

tono: cada una de las intensidades de gris comprendidas entre el negro y el blanco distinguibles en una imagen.

ultravioleta (UV): región del espectro electromagnético entre 0.01 y 0.4  $\mu\text{m}$ .

umbral: valor de número digital que se toma como límite inferior en el histograma de frecuencias de una imagen para efectuar distintos tratamientos digitales.

vector: cantidad provista de una magnitud y una dirección.

visible: región del espectro de energía electromagnética entre 0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ , detectable por el ojo humano.

Original recibido: Octubre de 1991.

Original aceptado: Noviembre de 1991.

## Estudio mineralógico del yacimiento de paligorskita de Bercimuel (Segovia) y de su entorno.

Por M. SUAREZ (\*), J. NAVARRETE (\*) y J. M. MARTIN-POZAS (\*)

### RESUMEN

En el presente trabajo se estudian, desde el punto de vista mineralógico, los materiales del yacimiento de paligorskita de Bercimuel (provincia de Segovia) y los relacionados con éste, localizados en el área Pajareros-Bercimuel. Estos materiales se enclavan en facies distales de abanicos aluviales de edad Miocena constituidos por limos rojos, siendo frecuentes las costras carbonatadas, generalmente de composición calcítica. Los datos mineralógicos obtenidos por DRX muestran que illita y cuarzo están siempre presentes en las muestras estudiadas como principales minerales detríticos junto con caolinita y feldespatos, que se encuentran en muy bajas cantidades. La paligorskita se asocia a dichos minerales y ocasionalmente a esmectitas y a un interestratificado irregular illita-esmectita.

Palabras clave: Paligorskita, Arcillas, Abanicos aluviales, Cuenca del Duero.

### ABSTRACT

In this work, materials of the palygorskite deposit of Bercimuel and those related with the deposit are mineralogical studied. These materials are developed in the distal facies of Miocene alluvial fans. In this zone, found by red slits, carbonated crust of calcitic composition are frequent. The mineralogical results are obtained by X-Ray Diffraction. Illite and quartz are present in all the studied samples, and those are the principal detritic minerals with minor amounts of kaolinite and feldspar. Palygorskite is associated with smectites and a irregular interstratified illite-smectite.

Key words: Palygorskite, Clays, Alluvial fan, Duero Basin.

### INTRODUCCION

El yacimiento de paligorskita de Bercimuel se sitúa en las proximidades de dicha localidad, al NE de la provincia de Segovia, en la región central de la Península Ibérica, en la zona central de una pequeña depresión (fig. 1) que está orientada NE-SO y limita al oeste con la Sierra de Honrubia-Pradales y al este con la Sierra de Ayllón (Sistema Central).

Según APARICIO y GARCIA-CACHO (1970) esta depresión tiene su origen en la tectónica de bloques del Sistema Central, siendo las sierras que la flanquean bloques elevados. El desmantela-

miento de los bloques elevados de las Sierras de Honrubia-Pradales y Ayllón produce el relleno de la depresión por materiales terciarios y cuaternarios, fundamentalmente de edad neógena. El relleno de la cuenca durante el Mioceno se realiza mediante sistemas de abanicos aluviales procedentes de ambos relieves, que evolucionan hacia el norte a facies lacustres. Posteriormente existe otro desarrollo de abanicos aluviales plio-pleistocenos representados en las vertientes norte de las dos sierras flanqueantes. Según MOLINA Y ARMENTEROS (1986) y MARTIN SERRANO (1988), estos últimos sistemas de abanicos corresponden a las «Rañas» de otras regiones de la Península, y suponen la ruptura morfológica entre dos superficies de erosión consideradas como pedimento de edades plioceno y plio-pleistoceno, respectivamente. Por último se produce

(\*) Area de Cristalografía y Mineralogía del Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. Pza. de la Merced, s/n. 37008 Salamanca.

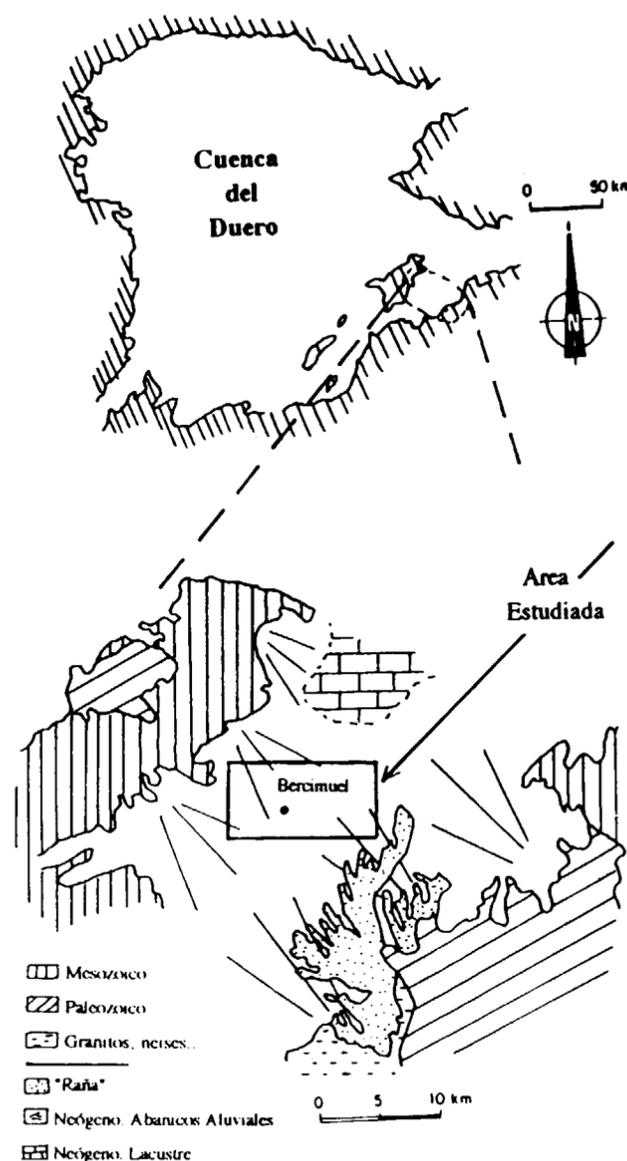


Figura 1.—Mapa de situación de la zona estudiada.

el encajamiento de la red fluvial en la que se encuentran frecuentes aterrazamientos.

Trabajos en los que se trate la zona objeto de este estudio son escasos en la bibliografía, pudiendo destacarse por estudiar al menos parcialmente dicha zona los de GARCIA DEL CURA (1974), ARMENTEROS y ALONSO GAVILAN (1984), FERNANDEZ-MACARRO et al. (1988) y SUAREZ (1989 y 1992). A modo de resumen se

puede decir que orlando a los relieves de Honrubia y Somosierra, se sitúan una serie de abanicos aluviales cuyas características dependen, lógicamente, de la litología y actividad del área fuente y de las condiciones climáticas. Se trata de abanicos áridos o semiáridos, con no muy alto grado de evolución en sus materiales, y con frecuentes encostramientos carbonatados, favorecidos por la presencia en las áreas fuente de materiales calcíticos y dolomíticos, y por el sistema discontinuo de los aportes. ARMENTEROS y ALONSO GAVILAN (*opus cit.*) estudian la génesis de los caliches situados en los abanicos aluviales miocenos que orlan el zócalo preterciario de Honrubia-Pradales, sugiriendo que la formación de las costras se produjo en la zona vadosa de perfiles edáficos calcimorfos bajo los efectos de un clima cálido con estación seca marcada, e identifican paligorskita que consideraran formada en una etapa diagenética anterior a la carbonatación del perfil edáfico.

Paralelamente al estudio mineralógico los autores del presente trabajo han realizado el correspondiente a las propiedades físico-químicas y de aplicación de la paligorskita del yacimiento de Bercimuel, cuyos resultados han sido recogidos en diversos trabajos previos (SUAREZ et al., 1991 y 1992).

#### MATERIALES Y METODOS

Se han estudiado un total de 112 muestras procedentes de cinco series, cuatro afloramientos, tres sondeos y seis calicatas (fig. 2). Los sondeos y calicatas fueron proporcionados por la empresa M.Y.T.A. (Minería y Tecnología de Arcillas, Zaragoza) la cual explota el yacimiento actualmente. El estudio de campo se completó con el mineralógico, cuya base ha sido la realización de difractogramas de Rayos X, tanto de la roca total en polvo, como del agregado orientado, en condiciones ambientales y solvatado con etilenglicol y, en algunos casos, calentados a 550° C. Los difractogramas se han realizado con un equipo Siemens D-500, con anticátodo de Cu y monocromador de grafito.

Las condiciones de trabajo han sido las siguientes: 30 mA, 40 Kw y velocidad de barrido de 2° de 2Ø por minuto. Para la cuantificación de las distintas fases minerales se siguió el Método de los Poderes Reflectantes (MARTIN POZAS, 1975).

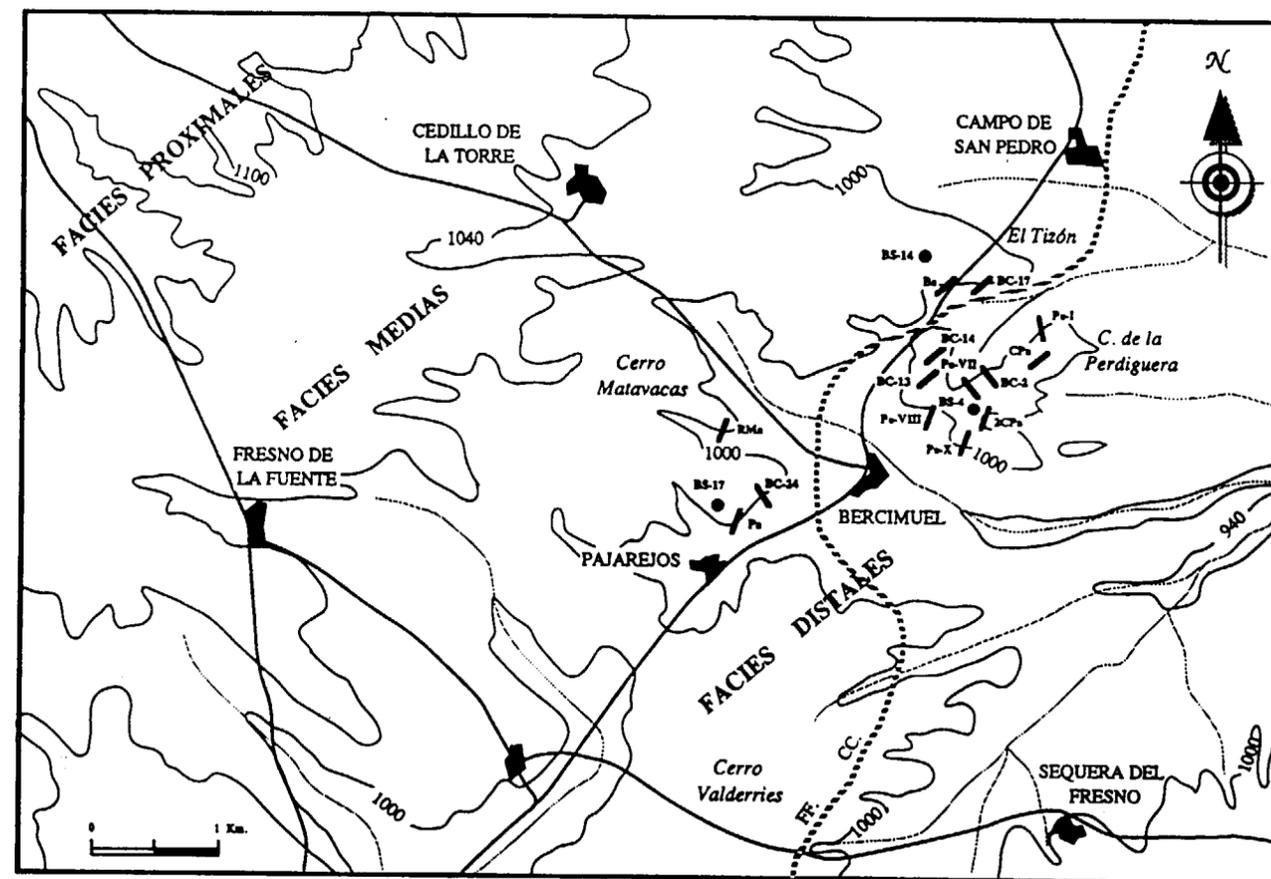


Figura 2.—Mapa de situación de las series, sondeos, calicatas y afloramientos estudiados

#### AREA DE ESTUDIO

La zona en la que se enclava el yacimiento de paligorskita de Bercimuel, se puede describir como formada por suaves laderas enraizadas en la Sierra de Honrubia, que están cortadas por la red hidrográfica (que drena hacia el norte, al río Riaza), con cotas que descienden desde los 1170 m en las zonas más próximas de la Sierra, hasta los 940 m en el río de Bercimuel. Están formados por materiales de los abanicos aluviales miocenos cuya cabecera se apoya en la Sierra de Honrubia, y proceden de ésta. Hacia el este aumentan de nuevo las cotas pasando a los materiales de los abanicos enraizados en Somosierra.

Los materiales correspondientes a los abanicos de Honrubia se caracterizan por estar constituidos por limos rojos, que en sus facies medias y medio-distales presentan canales intercalados

de 6-10 m de ancho, y 2 m de potencia máxima (en la zona inferior, en las proximidades de Cedillo de la Torre). El relleno de dichos canales está formado por conglomerados heterogranulares, con grandes clastos de carbonatos ( $\leq 20$  cm), a veces disueltos en su zona central, y en menor medida de cuarzo y cuarcita, con cemento carbonatado. Estos canales evolucionan en la vertical pasando a tener menor potencia ( $\leq 0,5$  m) y a estar constituidos fundamentalmente por cantos de naturaleza silíceas, siendo el centil de aproximadamente 7 cm. Los canales con cantos de cuarzo y cuarcita centimétricos también se encuentran en las proximidades de la localidad de Fresno de la Fuente. Las facies más distales (área de Pajareros-Bercimuel en la que se centra este estudio mineralógico) están constituidas por limos rojos sobre los que se desarrollan frecuentemente encostramientos carbonatados.

En la zona del Cerro de Valderriés se encuentran materiales ligeramente diferentes a los anteriores, constituidos por limos rojos con cantos dispersos ( $\leq 2$  cm) de litología variada: cuarzo, cuarcita, pizarras y micaesquistos, que deben pertenecer a abanicos con área fuente en Somosierra.

Sobre estos materiales, se localiza un episodio más energético que debe responder a una reactivación del relieve, de manera que a techo de toda la zona aparecen, con base erosiva, conglomerados con cantos de cuarzo y cuarcita redondeados, que, ocasionalmente, presentan pátina de óxidos de Fe, con matriz limosa rojiza y lavado de finos en superficie, dando lugar a acumulaciones de cantos cuyo tamaño disminuye a medida que nos alejamos del área fuente desde decimétrico a centimétrico (en la zona de la Perdiguera), y que deben suponer facies proximales de los abanicos reactivados, y que se corresponden con la Superficie S-III de GARCIA DEL CURA (1974).

Así pues, en la zona del yacimiento, se encuentran los materiales pertenecientes a las facies distales de los abanicos enraizados en la Sierra de Honrubia, que constituyen lo que podemos denominar Unidad Inferior; sobre ellos y en contacto erosivo, los correspondientes a facies proximales de los abanicos reactivados que denominamos Unidad Superior.

En la figura 2 se encuentran esquematizadas la posición de las facies de abanico de la Unidad

Inferior, de una manera aproximada, ya que no se pretende realizar un estudio estratigráfico de detalle, sino una interpretación global de los materiales relacionados con el yacimiento objeto de este estudio. También se encuentran reflejados la localización de los afloramientos, series, sondeos y calicatas estudiados que se describen a continuación y que se agrupan en tres zonas: El Tizón, Matavacas-Pajareros y La Perdiguera, de las que se reproducen en las figuras 3 a 7 las más significativas, junto con la composición mineralógica de las muestras estudiadas.

#### ZONA DE PAJAREROS-MATAVACAS

En esta zona, localizada al SO de la cantera de Bercimuel se estudian el sondeo BS-17, la calicata BC-24 y las series Pa y Ma. Los materiales estudiados tienen a techo las facies conglomeráticas de la Unidad Superior y están constituidos por limos rojizos con un importante grado de carbonatación puesto de manifiesto por la abundancia de costras, de laminares a masivas. La carbonatación es muy intensa, especialmente en los materiales correspondientes a la serie Ma, la cual está formada por margas y arcillas alternando con costras carbonatadas.

Entre Matavacas y Pajareros hay una diferencia mineralógica importante. El porcentaje de carbonatos es más elevado en Matavacas (fig. 3), donde la paligorskita no aparece, siendo el mineral de «transformación» la esmectita. En las mues-

tras estudiadas en la serie Ma los carbonatos suponen aproximadamente el 70 por 100 de la roca total, y se trata de calcita que está acompañada por arcillas (illita y esmectita) y cuarzo en muy pequeña proporción. En la zona de Pajareros los procesos de carbonatación han sido también muy intensos, afectando de manera desigual a los materiales limo-arcillosos rojos que la caracterizan (fig. 4), en los que los procesos de transformación son locales, dando lugar a niveles con elevado porcentaje de paligorskita, que no tienen gran continuidad lateral, habida cuenta la falta de correlación en los datos mineralógicos de la serie, sondeo y calicata estudiados.

La calcita puede llegar a suponer el 40-50 por 100 en algunas muestras, no encontrándose en ningún caso dolomita, y estando relacionada con los procesos de encostramiento observados en toda la zona. Los minerales predominantes (presentes en la totalidad de las muestras estudiadas) son, sin embargo, cuarzo e illita, de manera que en esta zona se encuentran niveles formados exclusivamente por minerales detríticos (cuarzo, illita, feldespatos y caolinita), otros en los que el contenido en paligorskita llega a ser importante y ocasionalmente, cantidades elevadas de esmectitas. Estas esmectitas que están ausentes en las partes altas de los materiales estudiados se encuentran en contenidos que oscilan entre el 5 y el 10 por 100, superando esta proporción sólo en un caso (muestra Pa-3). La paligorskita apare-

ce en la mayor parte de las muestras encontrándose en contenidos que oscilan entre el 30 y 70 por 100. Feldespatos y caolinita se identifican en muy pequeña proporción.

#### ZONA DE EL TIZÓN

Comprende el sondeo BS-14, afloramiento Be y calicata BC-17. En esta zona de «El Tizón» se estudian materiales arcillosos que a muro, y en torno de la curva de 1.000 m, presentan encostramientos carbonatados con calcita y dolomita. El tramo arcilloso (fig. 5), que presenta estructura prismática y rasgos de bioturbación (pedotúbulos), está formado por cuarzo, illita y paligorskita, fundamentalmente, junto con pequeñas cantidades de feldespatos, esmectitas y caolinita, presentando a techo derrubios de la Unidad Superior. En este tramo arcilloso el mayor porcentaje de paligorskita se encuentra a muro, aumentando hacia techo el contenido en minerales detríticos. También se identifican ocasionalmente pequeñas cantidades (sin cuantificar) de un interestratificado irregular illita-esmectita.

El tramo carbonatado situado a muro presenta tanto calcita como dolomita. Estos carbonatos pueden suponer más del 50 por 100 de la muestra en los casos en los que el grado de encostramiento es mayor. En la fracción menor de dos micras el mineral predominante es la paligors-

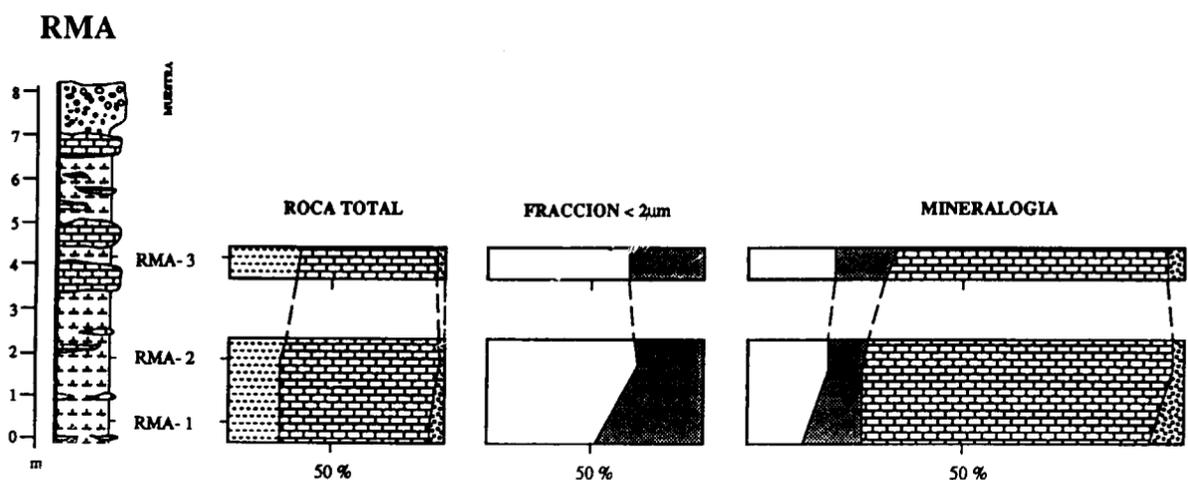


Figura 3.—Matavacas (Ma). Serie estratigráfica y mineralogía.

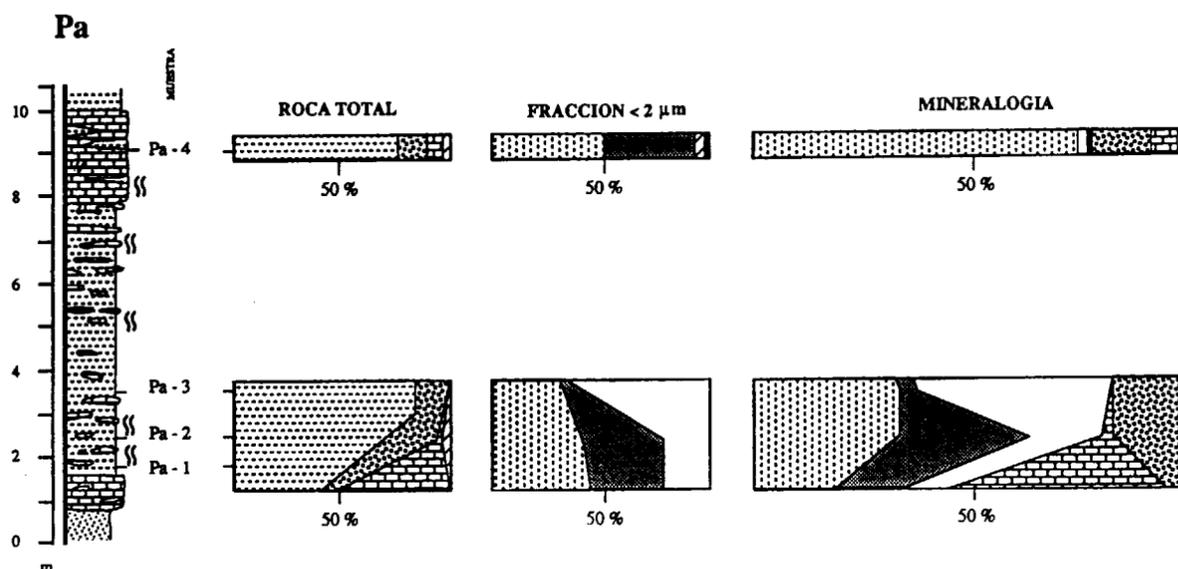


Figura 4.—Pajareros (Pa) Serie estratigráfica y mineralogía.

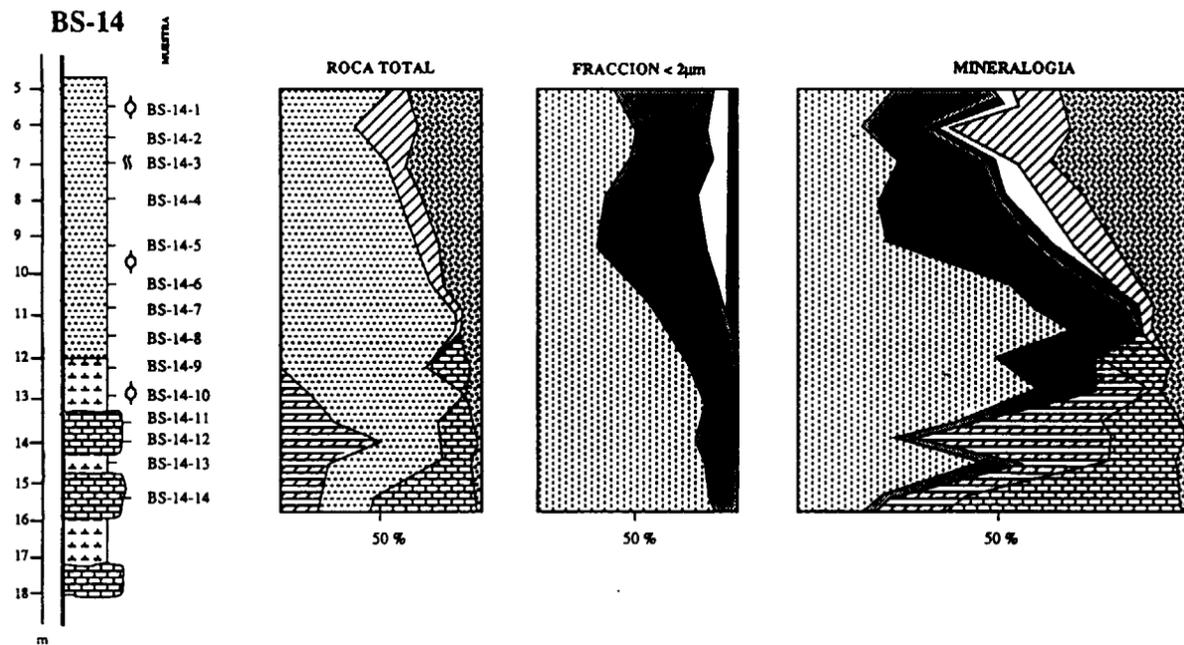


Figura 5.—Sondeo BS-14. Litología y mineralogía.

kita que se encuentra inversamente relacionada con la illita, siendo más abundante a muro, ya que, como se ha dicho anteriormente, el contenido en minerales detríticos (cuarzo, illita y feldespatos) es mayor a techo. Los contenidos en esmectita de las muestras estudiadas son muy bajos, sin superar nunca el 10 por 100 y estando ausente en las muestras con mayor proporción de paligorskita.

constituidos por limos arcillosos con illita y esmectita, que ocasionalmente presentan contenidos variables de paligorskita, sobre los que se desarrollan procesos de carbonatación, siendo muy similares a los estudiados en Matavacas. Como se puede observar en la figura 6, los carbonatos están presentes en todas las muestras estudiadas, siendo fundamentalmente calcita, si bien se encuentra dolomita en las muestras inferiores. El contenido en minerales arcillosos oscila entre el 30-50 por 100, aproximadamente, y están constituidas por illita y esmectitas, estas últimas aparecen con porcentajes muy elevados en comparación con el resto de los materiales estudiados en este trabajo, ya que en las dos muestras superiores llegan a suponer casi el 50 por 100 de la fracción menor de dos micras, si bien constituyen sólo el 10 por 100 de la roca total, aproximadamente, ya que estas muestras están formadas por calcita fundamentalmente.

El nivel paligorskítico (fig. 7) que constituye el yacimiento, se sitúa sobre la «serie inferior» y sobre la costra, como se decía anteriormente, presentando una potencia máxima de unos 8 m en los afloramientos estudiados; está erosionado a techo por el nivel conglomerático de la Unidad II, y todo ello por los procesos erosivos asociados a la red hidrográfica actual.

ZONA DE LA PERDIGUERA

Se estudian las series denominadas Pe-I, VIII y X, el sondeo BS-4, las calicatas BC-2, 7, 13 y 14, y los afloramientos Pe-VII, CPa y 2CPa. En esta zona del Cerro de la Perdiguera se encuentra el nivel paligorskítico explotado y los materiales que denominamos de la «serie inferior» (fig. 6), es decir, los situados topográfica y estratigráficamente bajo los materiales del yacimiento, y cuyo límite está constituido por la costra carbonatada, que en torno a los 1.000-1.002 m aflora en todo el cerro.

Los materiales denominados de la «serie inferior», por estar situados bajo el nivel paligorskítico explotado (series Pe-I y Pe-VIII), están

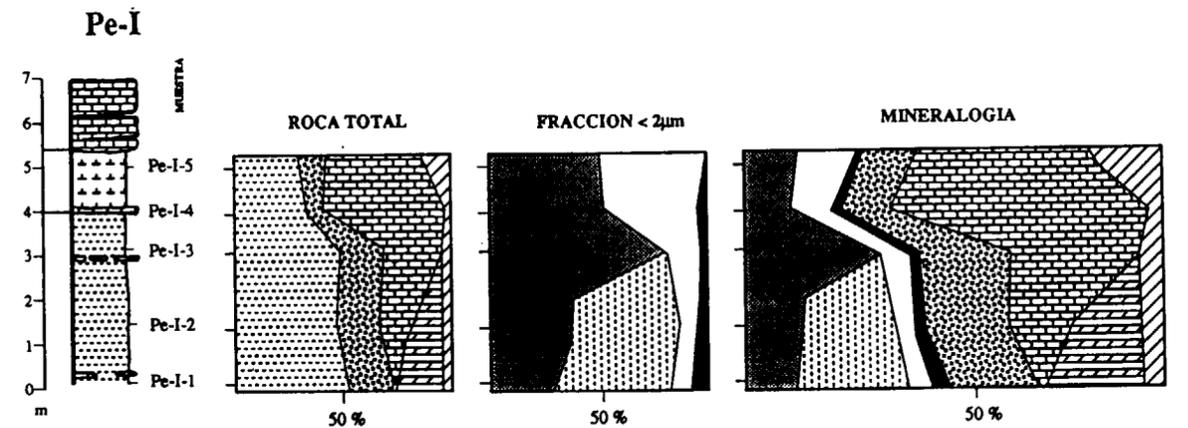


Figura 6.—Perdiguera «serie inferior» (Pe-I). Litología y mineralogía.

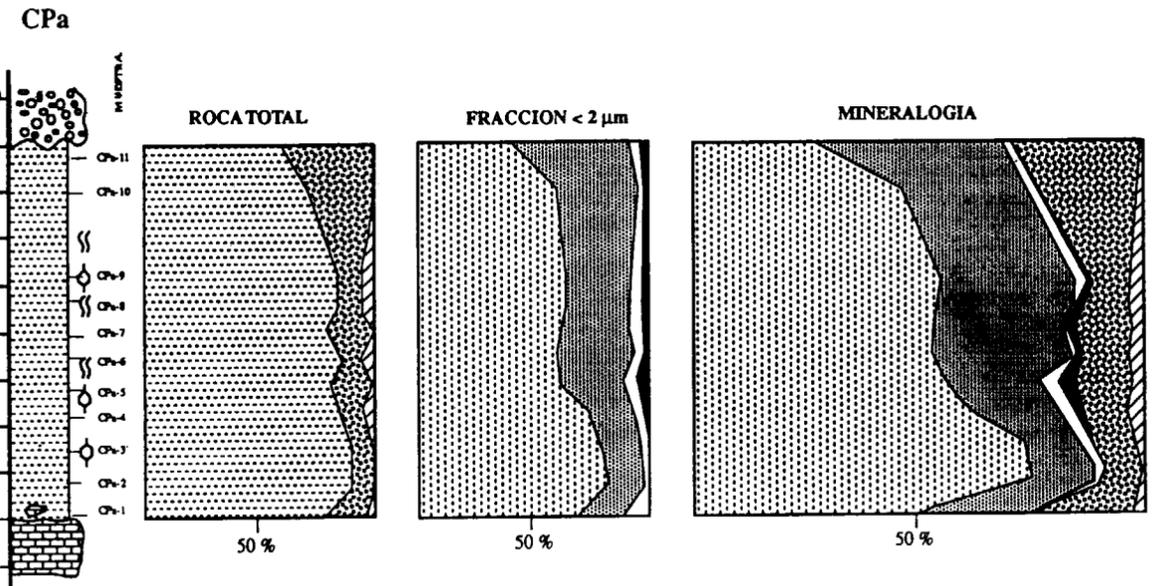


Figura 7.—Afloramiento de la cantera del Cerro de la Perdiguera (CPa). Litología y mineralogía.

En su parte inferior (en el frente de la cantera antigua) se estudian unos 5 m de materiales arcillosos limitados a muro por el nivel de costra carbonatada de naturaleza fundamentalmente calcítica (mencionado anteriormente, y que también supone el muro del afloramiento Pe-VII y de las calicatas BC-2, 7, 13 y 14), siendo el techo el suelo actual en las tierras de cultivo.

El tramo arcilloso presenta en su conjunto rasgos hidromórficos muy marcados, con removilización de óxidos de Fe y Mn, así como bioturbación, encontrándose pedotúbulos de hasta

1,5 cm de diámetro en su mitad superior, junto con «cantos blandos» dispersos de naturaleza arcillosa de hasta 1,5 cm de diámetro y tonos más rojizos que el resto de los materiales.

En su base presenta colores parcheados con tonos verdosos, rojizos y blanquecinos, son frecuentes los slikensides y tiene estructura poligonal. Ocasionalmente contiene nódulos de carbonatos idénticos a los de la base. Los tonos verdosos desaparecen en el segundo metro, predominando los rojizos, que son más intensos cuanto más a techo nos encontramos. Los dos últi-

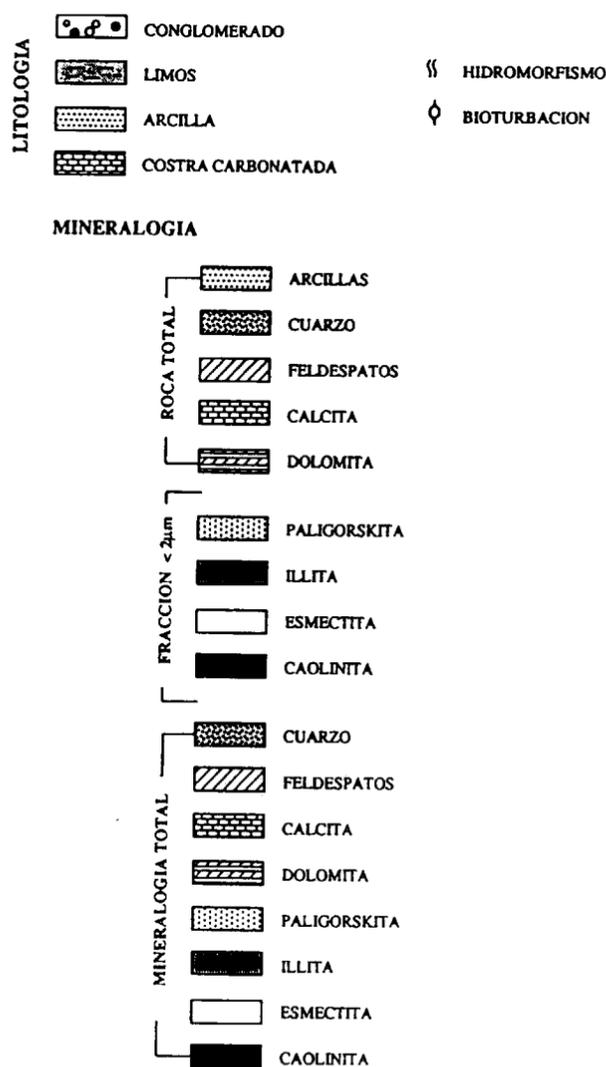


Figura 8.—Leyenda para las figuras 3 a 7.

mos metros, de color muy rojizo, presentan estructura prismática. En esta parte superior se identifican dos niveles en los que la coloración varía hacia techo de los mismos, pasando de los tonos rojizos característicos a marrónceos, y que deben corresponder a antiguas superficies edáficas.

Lateralmente, y en el frente de cantera más reciente aflora el techo del nivel paligorskítico, cuya potencia alcanza los 8 m, apareciendo en su parte superior nódulos decimétricos dispersos de carbonatos. El límite superior es una super-

ficie irregular, erosiva sobre el yacimiento, originada por los materiales conglomeráticos de la Unidad Superior. Bajo esta superficie hay una franja arcillosa de unos 10 cm, de tono rojizo-morado, probablemente de iluviación de la matriz del nivel conglomerático, y en la que la illita llega a suponer el 53 por 100 de la muestra estudiada.

La costra carbonatada del nivel inferior es fundamentalmente calcítica, conteniendo pequeños vestigios de cuarzo (1 por 100) y minerales arcillosos (6 por 100). La composición mineralógica de las muestras correspondientes a la parte inferior del tramo arcilloso de este perfil es muy similar. Están constituidas por arcillas (80-92 por 100), cuarzo y feldespatos, estos últimos no superan el 4 por 100. En la fracción menor de dos micras destaca la paligorskita, que es más abundante en la parte basal (zona con estructura poliédrica), aumentando en la zona superior el contenido en illita. Caolinita y esmectitas son minoritarias en el perfil. Se ha determinado la presencia de un interstratificado illita-esmectita irregular, más abundante a muro, donde en algunas zonas de la muestra puede llegar a ser un constituyente fundamental junto con illita y paligorskita. La paligorskita supone del 50-73 por 100 de la roca total.

### CONCLUSIONES

Así, pues, el yacimiento de paligorskita de Bercimuel se extiende desde el «Cerro de la Perdiguera» hasta la zona de «El Tizón», estando cortado por la erosión. La paligorskita, como se ha dicho en repetidas ocasiones, se encuentra asociada a cuarzo e illita fundamentalmente, y en menor proporción a feldespatos, esmectitas, caolinita y un interstratificado irregular illita-esmectita. El contenido medio de paligorskita es del 60-70 por 100, descendiendo generalmente de muro a techo, y siendo menor en la zona de El Tizón que en La Perdiguera. Su génesis debe estar ligada a procesos postsedimentarios que transformaron el sedimento inicial de los abanicos aluviales, compuesto, esencialmente, por limos arcillosos de cuarzo, illita, feldespatos y caolinita, como los correspondientes a la denominada «serie inferior» y a Matavacas, que parecen presentar menor grado de transformación. La costra carbonatada que se sitúa a muro del yacimiento debe ser posterior al mismo, instalándose

en relación con niveles freáticos colgados, en la zona de una fuerte variación textural que supone el paso de la paligorskita a limos de micas con cuarzo. Precisar las condiciones paleogeográficas estrictas que condicionaron la formación de la paligorskita requeriría un estudio paleogeográfico y paleohidrogeológico de detalle, que queda fuera del marco de este trabajo.

Es de suponer que la posición paleogeográfica en la zona de confluencia de abanicos aluviales enfrentados, sea un factor determinante en el proceso de transformación de los materiales sedimentarios, entre ellos procesos de tipo edáfico puestos de manifiesto por los rasgos de bioturbación e iluviación observados. Sin embargo parece que la formación de la paligorskita no está directamente relacionada con estos suelos, ya que los horizontes que se pueden reconocer por diferencias de color en el afloramiento del frente de cantera, no tienen variaciones mineralógicas, siendo la paligorskita el mineral fundamental en todo el nivel, disminuyendo ligeramente a techo su contenido, donde los materiales parecen estar transformados, habiéndose formado la paligorskita con posterioridad al depósito de todos los materiales del yacimiento. Es decir, la sedimentación de los limos se produciría con periodos de interrupción en los que se formarían suelos no muy desarrollados, posteriormente, y antes del depósito de la Unidad Superior se produciría la transformación, dando lugar a la paligorskita por la conjunción de las condiciones físico-químicas requeridas: alta actividad de Si y Mg y pH básico (SINGER y NORRISH, 1974; WEAVER y BECK, 1977; ELPRINCE et al., 1979, etc.) en clima árido-semiárido en el que alternarían periodos de saturación en agua de los materiales, con otros de desecación por una fuerte evaporación.

En estas condiciones, la alteración de los silicatos en un medio semiconfinado (choque de dos sistemas de abanicos con áreas fuentes muy próximas) daría lugar al incremento de las concentraciones de Si y Mg, provenientes no sólo de la alteración de minerales heredados (incluido el cuarzo) sino de las aguas de escorrentía.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo desean expresar su gratitud a don Francisco Gonzalo Corral y a la Empresa M.Y.T.A., así como a don Eloy Molina Ballesteros por su inestimable ayuda.

### REFERENCIAS

- APARICIO, A., y GARCIA-CACHO, L. (1970): *Estudios Geológicos de la zona metamórfica de Honrubia, Sistema Central Español*. Estud. Geol., 26, 297-315.
- ARMENTEROS, I., y ALONSO GAVILAN, G. (1984): *Génesis y evolución de los caliches miocenos del sureste de la depresión del Duero*. Estud. Geol., 40, 153-163.
- ELPRINCE, A. M.; MASHHADY, A. S., y ABA-HUSAIN, M. M. (1979): *The occurrence of pedogenic palygorskite (attapulgitite) in Saudi Arabia*. Soil. Sci., 128-4, 211-218.
- FERNANDEZ-MACARRO, B.; ARMENTEROS, I., y BLANCO, J. A. (1988): *Procesos de alteración y paleosuelos ligados a la sedimentación miocena del NE de la provincia de Segovia, Depresión del Duero*. Act. Geol. Hisp., 23-4, 269-281.
- GARCIA DEL CURA, M. A. (1974): *Estudio sedimentológico de los materiales terciarios de la zona centro-oriental de la Cuenca del Duero (Aranda de Duero)*. Est. Geol. 30, 579-597.
- MARTIN POZAS, J. M. (1975): *Análisis cuantitativo de muestras policristalinas por D.R.X.* En Difracción de muestras policristalinas. Método de Debye-Scherrer. I.C.E. Univ. de Valladolid. Ed. J. A. Saja.
- MARTIN SERRANO, A. (1988): *Sobre la transición Neógeno-Cuaternario: El papel morfodinámico de la Raña*. Congreso Geol. de España. Comunicaciones II, 395-398.
- MOLINA, E., y ARMENTEROS, I. (1986): *Los arrasamientos plio-pleistocenos en el sector suroriental de la Cuenca del Duero*. Stv. Geol. Salm. XXII, 293-307.
- SINGER, A., y NORRISH, K. (1974): *Pedogenic palygorskite occurrences in Australia*. Am. Miner., 59, 508-517.
- SUAREZ, M.; ARMENTEROS, I.; NAVARRETE, J., y MARTIN POZAS, J. M. (1989): *El yacimiento de paligorskita de Bercimuel: Génesis y Propiedades Tecnológicas*. Stv. Geol. Salm. XXVI, 27-46.
- SUAREZ, M.; FLORES, L. V.; AÑORBE, M.; DIEZ, J. A.; NAVARRETE, J., y MARTIN POZAS, J. M. (1991): *Proc. 7th Euroclay Conf. Dresden*, III, M. Storr, K. H. Henninsh and P. Adolphi Eds. 1019-1023.
- SUAREZ, M. (1992): *El yacimiento de paligorskita de Bercimuel (Segovia). I. Mineralogía y Génesis. II. Caracterización físico-química del mineral y activación ácida*. Tesis Doctoral, Univ. de Salamanca, ined. 296 pp.
- WEAVER, C. E., y BECK, K. C. (1977): *Miocene of the S. E. United States; A model for chemical sedimentation in a perimarine environment*. Sediment. Geol., 17-1/2, 234 pp.

Original recibido: Mayo de 1993.

Original aceptado: Junio de 1993.

# Posible contribución de la infraestructura hidrogeológica al Programa Nacional de ARU.

Por P. NIETO LOPEZ-GUERRERO (\*)

## RESUMEN

Se presentan los grandes rasgos de una posible (infra-) estructura, mediante la aplicación de técnicas plenamente asequibles incluso económicamente, que posibiliten aprovechar las ventajas de la infiltración controlada, eventualmente en el Programa Nacional de ARU. La extensión de estas consideraciones al caso del agua clara, ofrece perspectivas interesantes para casos graves: problemática agrícola, transferencias de agua, riadas, sobreexplotación costera, etc.

*Palabras clave:* Infiltración controlada, Sobreexplotación costera, Planificación hidrológica, Protección de acuíferos.

## RESUME

Les grands traits d'une possible (infra-)structure sont présentés à fin de pouvoir utiliser les avantages de l'infiltration contrôlée, éventuellement dans le Programme National des ERU, et cela à travers l'application de techniques tout-à-fait disponibles même économiquement. L'extension de ces considérations au cas de l'eau claire, apporte des perspectives intéressantes dans des cas graves: problématique agricole, transferts d'eau, inondations par crues, surexploitation côtière, etc.

*Mots-clé:* Infiltration contrôlée, surexploitation côtière, planification hydrologique, protection des nappes.

Una faceta de esta contribución consiste en la utilización correcta de la infiltración controlada en el terreno —allí donde sea posible— permitiendo así un menor grado de exigencia en la calidad del efluente de las estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas involucradas (y en consecuencia un coste mucho menor en su inversión y mantenimiento), además de la recarga subterránea de dichos efluentes y la consiguiente disponibilidad de un agua complementaria para el mayor consumidor, con diferencia: el agricultor.

En una descripción somera, este artículo pretende reunir fases necesarias para la puesta en práctica de este planteamiento, que constituyen elementos técnicos de la mencionada contribución al Programa sobre ARU (1); la base del interés de este enfoque reside en las peculiaridades

de la infiltración controlada, comentadas en otro lugar (2). Se dejan para otra ocasión aspectos fundamentales como son los legales, económicos, etc.

Enmarcando el tema, existen tres vectores que confluyen en una eventual infiltración controlada y que condicionan su aplicabilidad en cada caso concreto: las características del terreno, las del vertido y otras varias del lugar en sí. Este artículo se centra principalmente en el primer grupo —las características del terreno, desde su perspectiva hidrogeológica— si bien tiene en cuenta los otros dos ya que cualquiera de ellos puede ser determinativo, según el caso.

Por otro lado, como consecuencia de la escala de Estado que tiene esta situación —constituida por la problemática en sí y la correspondiente normativa— la presente propuesta de contribución contempla igualmente la totalidad de la geo-

(\*) Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia. ITGE.

grafía española. En otras palabras, se pretende reunir elementos técnicos destacables en una aproximación a la estructuración de una metodología que defina las zonas susceptibles de tener unas condiciones hidrogeológicas favorables para realizarse una infiltración controlada en ellas, así como sus rasgos más importantes.

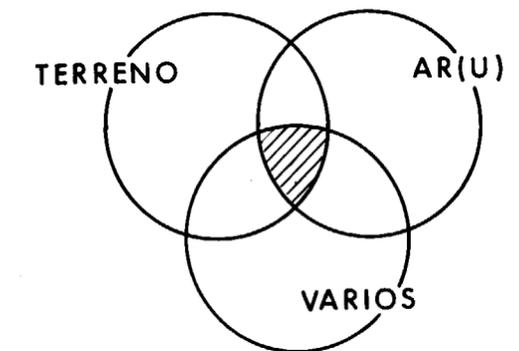
Según se indica en la última parte, el desarrollo que se presenta puede ser utilizado de manera prácticamente igual para el caso gemelo en que se disponga de agua clara en lugar de ARU. El artículo termina con unas consideraciones sobre esta perspectiva, en la actualidad.

Por su importancia —protección del consumo humano de agua— se llama la atención sobre la eventual existencia de sondeos para abastecimiento urbano, en una zona que resulte positiva en cuanto a las condiciones mencionadas para la infiltración controlada: será de urgencia definir un perímetro de protección de dicho sondeo y las limitaciones que deriven, así como su cuidadosa aplicación práctica. Parecida llamada de atención merece la gestión de las A. R. de zonas residenciales o urbanizaciones asentadas sobre materiales altamente fisurados, y con núcleos de población aguas abajo. En términos más generales, cabría contemplar como «áreas sensibles» (Directiva mencionada) aquellas zonas que tengan una alta velocidad de infiltración.

## 1. ESTRUCTURA DEL PROYECTO

Una forma de concretar la contribución mencionada consiste en realizar un proyecto para determinar aquellos casos geográficos en los que las condiciones presentadas —principalmente por el terreno y las AR(U), además de otras varias— posibilitan la aplicación de la infiltración controlada. Posteriormente, y sobre esta base, habría lugar para el diseño de las instalaciones con los datos concretos y singulares obtenidos en cada caso, precisando equipos, obra civil, puesta en marcha y mantenimiento, permitiendo así una evaluación de esta aplicación, económica entre otras cosas.

El objeto, pues, de esta primera parte, reside principalmente en reunir la información necesaria de cada variable (terreno, AR(U), varios) y, des-



pués de tratarla, superponer ponderadamente las distintas componentes temáticas para conseguir definir los casos geográficos positivos.

La superficie a contemplar al iniciar el proyecto depende del sistema que interese seguir, según se decida investigar simultánea o sucesivamente las tres variables: si se decide avanzar en paralelo, parece conveniente hacerlo por bucles sucesivos, refiriéndose cada bucle a la superficie correspondiente a cada unidad hidrogeológica inventariada y desarrollando el proceso hasta la definición de los casos geográficos, antes de pasar al bucle siguiente con otra unidad hidrogeológica; si por el contrario, se decide avanzar linealmente investigando en su totalidad un parámetro después de otro, parece conveniente comenzar con superficies correspondientes a unidades administrativas: Estado, Comunidad Autónoma o, sobre todo, Provincia. Un sistema híbrido, según cada parámetro, puede ser el óptimo para recoger la información pero requerirá un equipo de trabajo más potente y experimentado, si bien el tiempo de ejecución total será menor.

Otro criterio se tiene atendiendo a la urgencia de la situación: entonces, la zona de partida está constituida por un lugar determinado (o varios), cuyo carácter de *sensible* es conocido puesto que reúne las siguientes particularidades en cuanto al agua, en especial subterránea:

- *disponibilidad:* existe sobreexplotación del acuífero subyacente, susceptible de recarga por infiltración;
- *aplicación:* existe una demanda excesiva, principalmente para regadío;
- *degradación:* existe amenaza grave de conta-

minación por vertido de AR(U) insuficientemente depuradas, y por intrusión marina o salina.

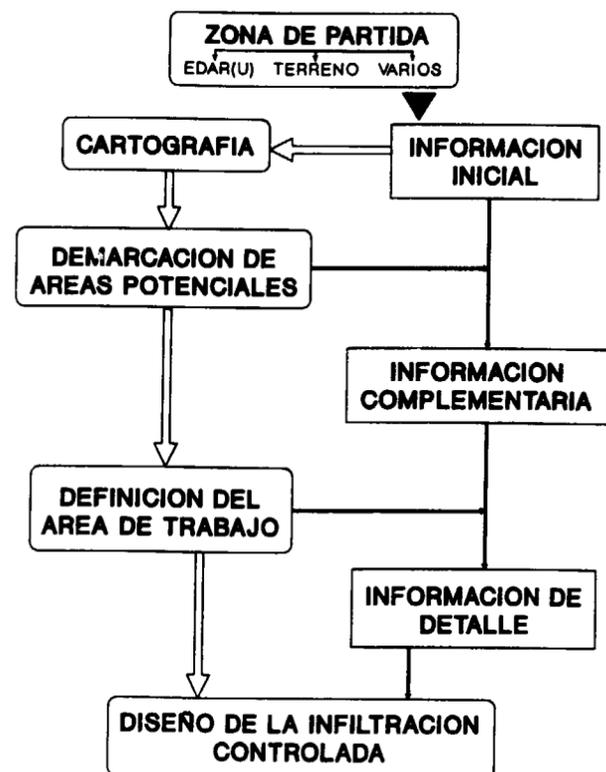
Entre estas zonas sensibles se puede priorizar aquéllas (conocidas) en estado *crítico*: sobre-explotación grave con alto grado de intrusión, sometidas a gran presión turística, agrícola, industrial incluso.

## 2. OBTENCION DE INFORMACION NECESARIA

La disponibilidad del tipo de información requerida, es muy variable según los sitios; siempre será insuficiente, en un principio. Se propone el siguiente procedimiento (ver esquema) por fases consecutivas, que pretende maximizar rendimientos en toda esta labor.

Cada paso sucesivo en la obtención de la información —inicial, complementaria, de detalle— estará sujeto a las operaciones clásicas: adqui-

### OBTENCION DE LA INFORMACION



sición, estudio, síntesis y representación gráfica siempre que sea posible. En cada una de estas tres fases, el estudio de la información correspondiente puede ser suficiente para aconsejar el abandono de la zona de partida considerada, posibilidad que es progresivamente más improbable según se avanza en la precisión de la información conseguida; de darse este caso de rechazo de zona, se volvería al punto de partida comenzando con una nueva zona.

La información versará sobre los objetos involucrados relativos al área considerada:

- *Geología-hidrogeología*: morfología, estratigrafía, litología, zonas insaturada y saturada, parámetros hidrodinámicos, piezometría, hidroquímica, puntos acuíferos, etc.
- *Aplicación del agua*: agrícola (superficies utilizadas, cultivos habituales, dotaciones, ...); urbana (ubicación, habitantes fijos y estacionales, eventuales sondeos de abastecimiento y perímetros de protección, colectores de saneamiento, eventual depuración de ARU, características del vertido, ...); industrial (ubicación, consumo, conexión al colector municipal o vertido propio, gestión del agua residual fabril, características del efluente, ...).
- *Peculiaridades varias*: climatología (pluviometría, temperatura, insolación, ...); conexión hidráulica con cauces superficiales; eventuales planes de desarrollo económico (zonación, precio del suelo, ...); actividades relacionadas con el tema del agua, en ejecución o en perspectiva (planificación hidrológica); etc.

El tipo de información está condicionado por la amplitud del área concernida, o sea por la escala de trabajo; por ejemplo, en la fase inicial comprende toda la extensión del sistema acuífero accesible por infiltración, midiéndose en km<sup>2</sup> o decenas de hectáreas cuando menos; la fase de detalle se limita a algunas hectáreas o menos. Análogamente, la adquisición de estos distintos tipos de información se lleva a cabo de manera diversa: en la etapa inicial se apoya sobre todo en la bibliografía públicamente disponible; en la complementaria, requiere una búsqueda más selectiva y especializada de la información existente, ayudada de reuniones de trabajo con técnicos de la zona —mayormente de las Administraciones públicas— y confirmada mediante salidas a campo, y realización de algún ensayo

o medición de parámetros; para el detalle se requiere una labor fundamentalmente de campo y de laboratorio.

Determinar la capacidad de infiltración del terreno es un elemento decisivo en la investigación. Normalmente el conocimiento de esta propiedad es de tipo genérico; los valores de permeabilidad por medición directa que existen se limitan a casos puntuales. Además, a efectos del diseño que aquí interesa, es necesario disponer de valores precisos suficientemente contrastados: conviene utilizar un sistema de aproximaciones sucesivas de forma a mantener un nivel homogéneo de exactitud en las diversas facetas de la información que se va consiguiendo, para evitar el hecho de que un esfuerzo excesivo realizado en una línea se vea posteriormente anulado por unos resultados definitivamente negativos obtenidos en otra línea, y ello porque según avanza la investigación crece el coste de las actuaciones involucradas, dada su naturaleza antes mencionada.

Como parte de la «información inicial», se puede contar con la publicación del ITGE *Mapa de riesgos de contaminación de las aguas subterráneas por vertidos sobre el terreno*, a escala 1:200.000, realizado para cada una de todas las provincias: si bien su objetivo es otro —facilitar la elaboración del informe hidrogeológico requerido en la Legislación (3) para autorizar un vertido al terreno— la delimitación de zonas que recoge sintetiza una gran información (que reseña la bibliografía) y clasifica el terreno en tres categorías según el grado de su vulnerabilidad, siendo evidentemente la permeabilidad de los materiales uno de los parámetros considerados principales. La memoria describe además rasgos generales de la provincia y características destacables de los sistemas acuíferos que comprende.

Uno de los fines de la información complementaria es confirmar la información inicial conseguida (población, uso de la tierra, situación del saneamiento, instalación de nuevas industrias...) así como actualizarla en lo posible y deseable en esta fase.

## 3. TECNICAS DE APOYO

La caracterización del terreno con suficiente precisión, sobre materiales que en principio ofrez-

can buenas perspectivas, como son los sedimentarios con porosidad intergranular media-alta, dispone de diversas técnicas que por el coste y tiempo que conllevan, se aplican normalmente para obtener la información complementaria o más bien de detalle, en una zona preseleccionada de superficie limitada. Esta aplicación aportará resultados que se complementan, e incluso en ocasiones se confirman mutuamente, proporcionando una garantía sobre la representatividad de los datos que equivale a una seguridad sobre lo acertado de las decisiones que se tomarán posteriormente apoyándose sobre ellos.

La realización de un sondeo será prácticamente inevitable allí donde no exista columna litoestratigráfica previa: la estructura y composición del terreno hasta una profundidad de unos 20 metros por debajo del nivel como mínimo (interesa alcanzar la base impermeable, si es posible), es básica para deducir su comportamiento hidrogeológico. Una vez desplazada la máquina de perforación sobre la zona, conviene aprovechar la situación y ejecutar otros sondeos menos profundos cuyo objetivo sea la zona insaturada, e incluso otros más someros: 10 ó 20 primeros metros. La ubicación de todos ellos vendrá asesorada por los resultados de un levantamiento de perfiles eléctricos (SEV) realizado previamente, así como por un esbozo de la probable implantación de las instalaciones que se persigue y de la consiguiente futura red de vigilancia específica de las aguas subterráneas (puntos de observación y muestreo).

La ejecución de estas perforaciones proporciona muestras del material atravesado, para su análisis en laboratorio, especialmente la granulometría: distribución de tamaños y grado de homogeneidad de los granos, importancia de los finos por su porcentaje y naturaleza.

La testificación geofísica de los sondeos —anterior a su revestimiento si sus paredes lo permiten— proporciona una imagen del entorno de cada sondeo, además de aportar un criterio para seleccionar las pasadas de interés especial para su análisis en laboratorio. Su estudio comparativo junto con los resultados de los perfiles eléctricos iniciales complementado con los testigos aportados por los sondeos y precisados con los resultados del laboratorio, indicarán la capacidad del lugar concreto para asumir una infiltración controlada.

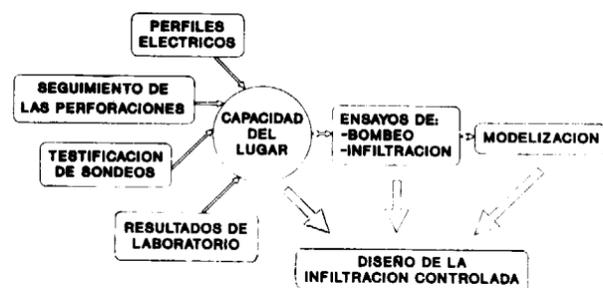
Un ensayo de bombeo a una profundidad determinada de forma que involucre a una altura de zona saturada mínima, proporcionará unos valores de los parámetros hidrodinámicos ajustados a los niveles que condicionarán el flujo subterráneo en la zona de recarga durante la infiltración; la repetición del ensayo a mayores profundidades sucesivas permitirá calcular la variación del valor de dichos parámetros para el caso de grandes oscilaciones locales del nivel piezométrico.

Disponer del valor de estos parámetros posibilita la aplicación de los modelos matemáticos de flujo, y la consiguiente capacidad para reproducir y predecir la dinámica subterránea, tanto más fielmente cuanto más representativos sean dichos valores. Añadiendo hipótesis de trabajo clásicas, como la supuesta inercia físico-química de un componente del agua infiltrada (nitratos), se puede obtener un orden de magnitud por exceso en distancias y tiempos relativos al penacho que se creará con el agua infiltrada, deduciéndose las dimensiones de la zona para la que se requiere una información detallada que posibilite la aplicación de modelos más complejos, entre otras cosas. Por ejemplo, se puede conseguir la evaluación del transporte de solutos (nitratos) en 2 y 3 dimensiones, dando paso a los cálculos que relacionen para un cierto período (meses de no-regadío) la cantidad de agua y compuestos particulares (nitratos) que la infiltración controlada aportará al acuífero, así como la extensión de éste que se verá afectada directamente por dicho aporte antes de su extracción (meses de sí-regadío), y también las características principales del sistema de bombeo que ésta necesitará: sondeos (ubicación, profundidad, situación de la rejilla, ...), impulsión (caudales específicos, potencia, diámetro, ...) valoraciones económicas, etc.

Por otro lado, el caudal de agua generado durante el ensayo de bombeo puede permitir la realización de ensayos de infiltración *in situ* que aporten precisión al conocimiento del comportamiento de la zona insaturada en este aspecto, comportamiento previsto sobre unos valores aproximados y teóricos de la permeabilidad proporcionados por las tablas de correspondencia con la granulometría obtenida de las muestras de suelos.

Es una garantía suplementaria ignorar los fenó-

### TECNICAS DISPONIBLES



menos de retención y degradación de compuestos químicos (contaminantes) que ocurren a lo largo del recorrido subterráneo del agua. Una aproximación intermedia razonable consiste en considerar solamente la dilución de su concentración por la progresiva mezcla del agua infiltrada con el flujo subterráneo, eligiendo valores de seguridad.

El ajuste de todas estas previsiones con datos reales, es uno de los objetivos principales de la posterior red de vigilancia específica del sistema, para en definitiva optimizar su funcionamiento.

Se recuerda el punto rojo que en todo este planteamiento supone cada sondeo para abastecimiento urbano, y el interés de su perímetro de protección escrupulosamente aplicado.

#### 4. OTRAS CONSIDERACIONES

Las actuaciones indicadas hasta aquí tienen como finalidad aprovechar las posibilidades de la infiltración controlada de las AR(U) suficientemente tratadas. Sin embargo, los resultados de la investigación esbozada pueden ser útiles en otras direcciones, que se comentan a continuación.

Si se consideran las aguas residuales agrícolas (4) en lugar de las ARU, el esquema hidrogeológico de la práctica del regadío correspondiente es igual al planteado en los apartados anteriores, particularmente en cuanto a constituyentes químicos (nitratos, pesticidas). Los resultados que

proporcione una investigación semejante a la esbozada pueden constituir un criterio relevante en la aplicación de la política agraria actual (PAC, FEOGA) particularmente en zonas acuíferas de recarga hidrogeológicamente importantes o próximas a sondeos de abastecimiento urbano, así como un argumento objetivo al considerar el orden de prioridad a aplicar en las actividades a recomendar en el dominio de las mejoras agrícolas actualmente en estudio: modernización de sistemas de regadío que derrochan agua, optimización del uso de productos agroquímicos, cambio (o anulación subvencionada) de cultivos, etc. (5, 6), y también en programas de reforestación y de restauración hidrológico-forestal.

Considerando ahora la problemática erosión/desertización, dentro de la contribución que la Hidrogeología es capaz de aportar a su resolución se está desarrollando la investigación para conseguir una mayor infiltración local del agua de lluvia en las zonas alta y media de las subcuencas litorales, de forma directa o derivada, para ayudar a reducir las temibles puntas de las avenidas y además proporcionar un recurso hídrico suplementario en estas zonas deficitarias. Complementariamente, la realización y sobre todo el mantenimiento de las obras necesarias, de tipo blando, que resulten de esta investigación, requerirá una mano de obra local y sin exigencias de cualificación, posiblemente susceptible de ser contemplada en el marco de los FEDER o FSE, al menos en cuanto a su implantación y primeros pasos, por tratarse de una actividad que, además, contribuye a solucionar el problema del abandono rural.

Dentro del capítulo de transferencias de recursos hídricos de unas regiones a otras, el diseño del itinerario que habrá de seguir el agua puede verse enriquecido por la consideración de derivaciones secundarias y temporales hacia zonas próximas al tendido que sean propicias para la infiltración: el agua subterránea conseguida sería utilizada en cotas más bajas o eventualmente recuperada y devuelta al circuito en épocas de alta demanda. Un caso particular en este ámbito, si bien distinto, que probablemente merezca la pena estudiar, viene constituido por los tradicio-

nales embalses construidos en superficies evidentemente impermeables, y que se encuentren sobre formaciones acuíferas subyacentes de alta transmisividad: en momentos de excedentes (riadas, por ejemplo), la existencia de una batería de sondeos especiales podría servir de aliviadero subterráneo cuando el nivel del agua embalsada alcanzase una cota predeterminada, transformándose (parte de) las puntas de las avenidas en aguas subterráneas suplementarias. Una vez probada la utilidad de esta faceta del uso conjunto embalses superficiales/embalses subterráneos, su consideración en el diseño de futuras presas podría incidir sobre la ubicación óptima que se les diera, especialmente en el litoral mediterráneo y en las islas.

Por último, recordar el caso en áreas litorales, de los efluentes del tratamiento de las ARU que son, o serán, evacuados mediante emisario submarino: es interesante considerar por sistema la posibilidad de su infiltración controlada, debido a las ventajas de tipo hídrico, económico, técnico y legal en un futuro próximo, además de higiénico-sanitarias (puntos negros en zonas de baño).

#### REFERENCIAS

- 1.—Directiva del Consejo de 21 de mayo de 1991, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas (91/271/CEE).
- 2.—*Los acuíferos y las aguas residuales urbanas: la infiltración controlada*. Boletín Geológico y Minero I.T.G.E., V. 103-5 (914-920), 1992.
- 3.—Artículo 94, Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas y desarrollo reglamentario (B.O.E. de 8 de agosto 1985).
- 4.—*Acuíferos, residuos y planes hidrológicos; algunas sugerencias*. Boletín Geológico y Minero. I.T.G.E., V. 103-3 (551-563), 1992.
- 5.—Orden de 24 de septiembre de 1992, M.O.P. y T. (B.O.E. de 16 de octubre 1992).
- 6.—Declaraciones del secretario general de Estructuras Agrarias (M.A.P. y A.) en relación con el Real Decreto 678/1993, de 7 de mayo, sobre obras para la mejora y modernización de los regadíos tradicionales (B.O.E. de 3 de junio 1993).

Original recibido: Junio de 1993.

Original aceptado: Junio de 1993.

# Análisis crítico de modelos de predicción de la erosión hídrica en minería y obra civil.

Por J. C. ARRANZ GONZALEZ (\*), J. ALMOROX ALONSO (\*\*\*) y R. ANTONIO GARCIA (\*\*)

## RESUMEN

En el presente trabajo se analizan los modelos de predicción de la erosión hídrica aplicables en proyectos de ingeniería civil y minería. Se profundiza en mayor medida en el modelo paramétrico USLE (Universal Soil Loss Equation), discutiendo para cada factor que lo compone su aplicabilidad y limitaciones.

Por último, se remarca la necesidad de un mayor esfuerzo investigador para el establecimiento de los factores de la mencionada ecuación de acuerdo a las condiciones locales y a los materiales más frecuentemente expuestos en este tipo de obras.

## ABSTRACT

This paper try to analyze the erosion models that we can apply in mining and civil engineering projects. It emphasizes in the applicability and limitations of USLE (Universal Soil Loss Equation) model, discussing each parameter.

As final conclusion, it underlines the need of higher investigation efforts to adjust the USLE factors to the local conditions and to the materials normally exposed in this kinds of works.

## 1. INTRODUCCION

La preocupación por los efectos de la erosión hídrica y por la conservación de los suelos se ha extendido recientemente a los ámbitos de la minería y de la ingeniería civil. No obstante, aunque los terrenos agrícolas producen los mayores volúmenes de sedimentos, los máximos ratios de erosión se producen en áreas en construcción o alteradas por minería a cielo abierto (ISRAELSEN et al., 1982).

Este interés, que ha venido muy ligado en Europa a los organismos medioambientales y que queda reflejado en normativas legales, no ha tenido, sin embargo, un tratamiento prioritario en la investigación. Por todo ello, pretendemos revisar el estado en que se encuentran los conocimientos sobre modelos para evaluar la erosión

en minería y obra civil, así como remarcar los puntos que consideramos claves para guiar el desarrollo de investigaciones futuras.

## 2. MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA EROSION

Los *modelos* son representaciones simplificadas de la realidad, que permiten la generalización necesaria en las Ciencias Naturales. La elaboración de un modelo representativo de un fenómeno es fundamental para su análisis, comprensión y, en consecuencia, para el planteamiento de actuaciones con el fin de regularlo.

El modelo de simulación será tanto mejor cuanto más se ajuste a la realidad, utilizando el conocimiento de las leyes físicas para su economía y generalización. Los modelos físicos analizan los procesos que regulan la generación de sedimentos y caudales, atendiendo a las leyes físicas que los gobiernan.

(\*) Instituto Tecnológico Geominero de España. Area de Ingeniería Geoambiental. Ríos Rosas, 46, 28003 Madrid.  
 (\*\*\*) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Dpto. de Edafología. Avda. Complutense, 28040 Madrid.

La *erosión* es un fenómeno extraordinariamente complejo desde el punto de vista físico y, consecuentemente, su análisis con rigor matemático y físico pasa por el planteamiento de numerosas ecuaciones, sumamente complejas y difíciles de aplicar en la práctica.

Para hacernos una idea de la complejidad del proceso, sin entrar en la formulación matemática completa, señalaremos que en principio, al abordarse la erosión hídrica por arroyada (regueros y entre regueros) deben considerarse cuatro procesos:

— Remoción por el impacto de la gota de lluvia.

- Remoción por el flujo de escorrentía.
- Transporte del suelo removido por salpicadura.
- Transporte del suelo removido por la escorrentía superficial.

La enorme complejidad del modelo se ilustra en la figura 1.

Todos los factores que regulan el proceso erosivo en cada una de sus fases, varían con el tiempo y por los efectos recíprocos entre el agua que cae y escurre, y los parámetros del suelo: textura, estructura, densidad, permeabilidad, re-

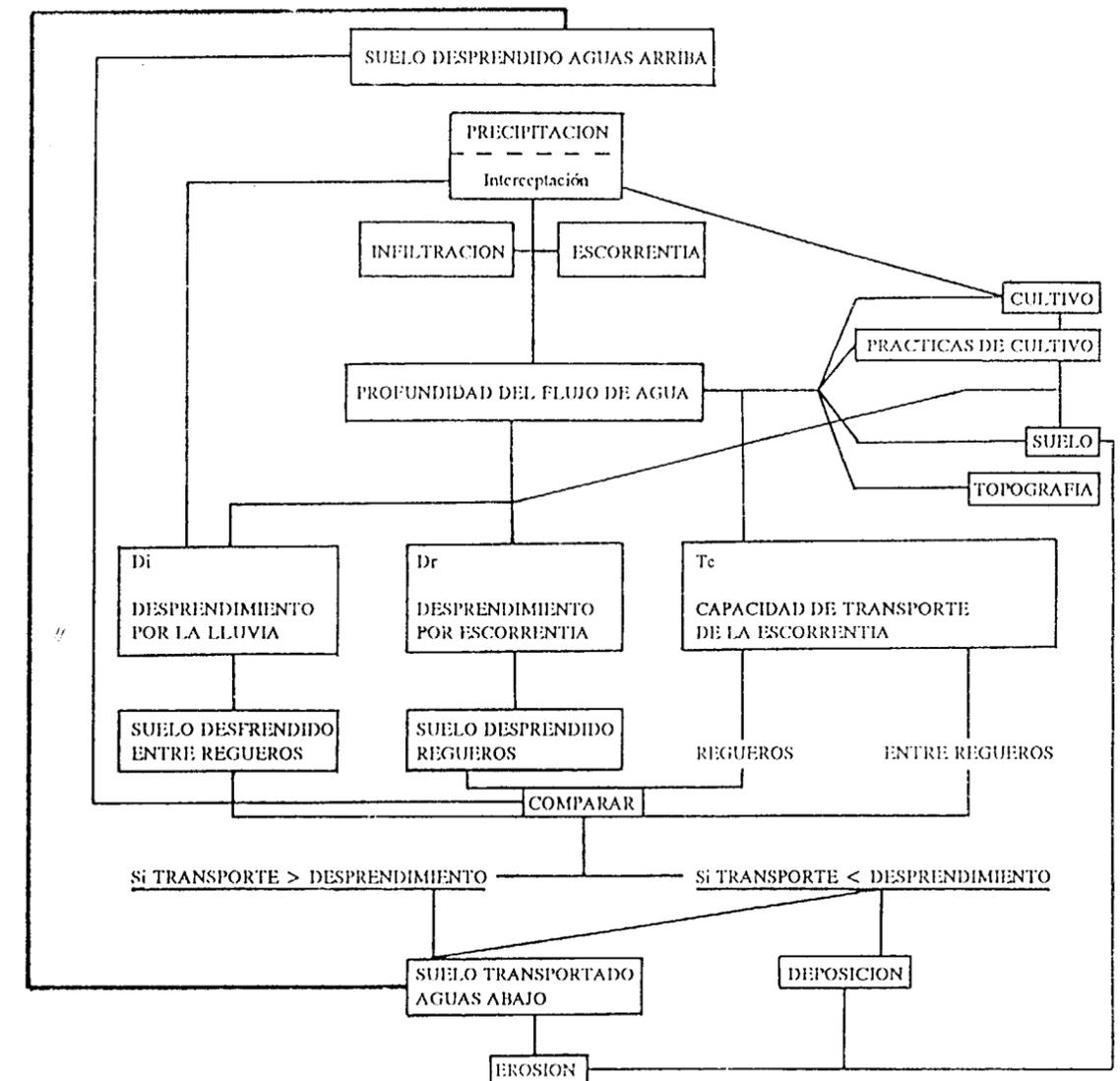


Figura 1

sistencia al esfuerzo cortante, viscosidad del flujo suelo-agua y temperatura.

Además, el control de las variaciones en la cantidad, energía, ángulo de incidencia, y todos los elementos que regulan el efecto del agua en el momento del impacto, es prácticamente imposible.

A todo esto se deben añadir las modificaciones microtopográficas que sufre la superficie por donde transcurre la escorrentía superficial con el tiempo, y el régimen que rige dicha circulación (laminar o turbulento); además de la dificultad de definir la variabilidad espacial y temporal inherente a los sistemas naturales.

Hasta aquí, las ventajas que pudieran derivarse de la consecución de un modelo con base física, entre las que cabría esperar su universalidad de aplicación, se mantienen. Sin embargo, la enorme complejidad de estos modelos, junto a la necesidad de gran cantidad de datos, en general desconocidos y difíciles de obtener, determina que durante su formulación se realicen aproximaciones o simplificaciones empíricas, casi siempre inspiradas en fenómenos de carácter local o puntual, perdiendo dicha universalidad, a la vez que aumenta el carácter estimativo del modelo.

Como ejemplos mencionaremos solamente dos:

- Modelo con base física, aunque muy simplificado, empleado en la selección de trazados viarios por el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Portugal (NASCIMENTO et al., 1974); validado en el centro de Portugal.
- Modelo físico de erosión hídrica en taludes de escombreras de mina, probado en una explotación de FECSA en Utrillas (Teruel), con limitaciones de aplicabilidad tanto temporales como espaciales (ASENSIO et al., 1992).

Ante la dificultad que muestra la aplicación práctica de los modelos con base física, se ha tendido al empleo de modelos paramétricos. La bondad del modelo paramétrico dependerá del rigor con que sus parámetros reproduzcan las condiciones ambientales de diseño, y de su capacidad de extrapolación. Dentro de los modelos paramétricos destaca la USLE. «Ecuación Universal de Pérdida de Suelo» por ser el modelo de predicción de pérdida de suelo con mayor aceptación y de más amplia aplicación por su simplicidad.

### Empleo de la USLE en minería y obra civil

La formulación general de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (Universal Soil Loss Equation) es:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad [1]$$

- A: pérdida de suelo media anual por unidad de superficie.
- R: erosividad de las precipitaciones.
- K: erosionabilidad del suelo.
- L: longitud de la ladera.
- S: grado de pendiente.
- C: cultivo y manejo del suelo.
- P: prácticas de conservación.

La ecuación fue deducida a partir de los datos obtenidos tras la investigación de la erosión en más de 10.000 parcelas a lo largo de 49 localidades de los EE. UU., ecuación que en su origen fue diseñada para estimar las tasas anuales de erosión en terrenos agrícolas de no muy fuerte pendiente.

A pesar de la extensa base de datos que le sirve de apoyo, el apelativo «Universal» puede resultar un poco desproporcionado, especialmente si es aplicada olvidando su origen.

Así, a la vez que sucesivas labores de investigación fueron ampliando las situaciones de aplicación en las que se mostraba como un modelo válido, en otros casos, sus limitaciones eran pasadas por alto. Se corre entonces el riesgo de hacer un mal uso de la ecuación (WISCHMEIER, 1976); cuando no se cae en el conformismo de dar por definitivos sus resultados cualitativos.

Como se comprende, al ser un modelo empírico, su validez depende de la exactitud al valorar los parámetros que componen la ecuación. Cuando se aplica en condiciones muy alejadas de las que sirven para su formulación aparecen distorsiones inherentes a la interdependencia entre sus parámetros.

Además, la USLE es una ecuación de pérdida de suelo, por lo que sólo es aplicable a la parte erosiva del modelo de erosión-deposición. Concretamente, es de aplicación a los elementos planos y estima la erosión entre-regueros y en regueros,

sin considerar las formas de erosión en cárcavas y barrancos.

De lo que no cabe duda es de que, por el hecho de estar la ecuación planteada como un producto de pocos factores, es posible su aplicación a cualquier supuesto, siempre que los valores que tomen los parámetros de la formulación reproduzcan las condiciones del medio. Para ello es necesaria una mayor investigación que determine los métodos de cálculo de dichos factores para diferentes condiciones de variación, abarcando toda la gama de posibilidades incluyendo los terrenos alterados por minería y obra civil.

Por último, destacaremos que la USLE es dimensionalmente correcta al considerar unidades para el factor K, de forma que las dimensiones del factor K son las del factor A entre las del factor R. Las unidades del S.I., que se corresponden con los valores numéricos habituales de la USLE son (ALMOROX, 1993): A ( $\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ); R ( $\text{hJ} \cdot \text{cm} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ) y K ( $\text{Mg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{hJ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ). El empleo de estas unidades evita la aparición de coeficientes numéricos innecesarios y los frecuentes errores y omisiones que pueden encontrarse en la bibliografía.

### 3. ESTIMACION DE LOS FACTORES DE LA USLE EN MINERÍA Y OBRA CIVIL

#### 3.1. Factor erosividad de la lluvia, R

El factor R, o erosividad de la lluvia, puede determinarse sin ningún problema por el método establecido por WISCHMEIER y SMITH (1965) o por cualquier otro método simplificado que haya sido validado en la zona de trabajo. Para su cálculo se puede hacer uso de los mapas de «Agresividad de la lluvia en España» (ICONA, 1988), que tras el análisis de las bandas de 162 puviógrafos y utilizado el método de Wischmeier han evaluado los valores del factor R para toda España; o del factor de Fournier modificado por ARNOLDUS (1977) y ALMOROX et al. (1992). La formulación para el cálculo de factor R, siguiendo a ICONA (1988) es:

$$R = 1/100 \sum \{1,212 + 0,8902 \log_{10} I_j\} \cdot (I_j T_j) \cdot I_{30} \quad [2]$$

[(cientos de  $\text{kp} \cdot \text{m} \cdot \text{mm}$ ) / ( $\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{año}$ )]  
I<sub>j</sub> en mm/hora

I<sub>j</sub>: intensidad de la lluvia.

T<sub>j</sub>: tiempo de duración del intervalo de intensidad uniforme I<sub>j</sub>.

I<sub>30</sub>: intensidad de la lluvia máxima en treinta minutos.

Aunque los autores indican como unidades  $\text{hJ} \cdot \text{cm}/\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{año}$ , habría que multiplicar el resultado por 0,981 para obtener dichas unidades; en la práctica el error es despreciable, por lo que podemos utilizar directamente sus resultados.

#### 3.2. Factor topográfico, LS

Los factores L y S, o lo que es lo mismo, el factor topográfico LS, se han calculado tradicionalmente siguiendo la formulación de WISCHMEIER y SMITH, 1978:

$$LS = (\lambda/22, 13)^m \cdot (65,41 \text{ sen}^2 \Theta + 4,56 \text{ sen } \Theta + 0,065) \quad [3]$$

En donde:

Θ: ángulo de la pendiente.

λ: longitud de ladera en metros.

m: exponente, función de la pendiente (WISCHMEIER et al., 1978).

La expresión anterior aparece normalmente como:

$LS = (\lambda/22,13)^m \cdot (0,0065 s^2 + 0,045 s + 0,065)$ , en donde «s» es la pendiente en %, y «m» toma los valores:

s	m
≥ 5	0,5
3,5 - 4,5	0,4
1 - 3	0,3
< 1	0,2

Esta deriva de sustituir el valor de senΘ por 100 · s, siendo la equivalencia real tgΘ = 100 · s. En consecuencia, sólo son asumibles los resultados cuando los valores de senΘ y tgΘ sean tan similares que se puedan considerar equivalentes (hasta un ángulo del 20 %, según WISCHMEIER

y SMITH, 1978). Señalaremos que expresar el factor S en función del seno del ángulo es más correcto que expresarlo en función de la tangente, ya que el esfuerzo cortante que aplica el agua al escurrir sobre el lecho por el que transcurre y la capacidad de transporte del flujo de escorrentía es proporcional al seno del ángulo (expresión del gradiente hidráulico). Si se quiere aplicar a ángulos mayores se debe sustituir de modo que se obtiene la expresión (ISRAELSEN et al., 1982):

$$LS = (\lambda/22, 13)^m \cdot [65,41 \cdot s^2/(s^2 + 10000)] + 4,56 \cdot s/\sqrt{s^2 + 10000} + 0,065 \quad [5]$$

Hasta aquí siempre se ha utilizado la misma ecuación aunque con diferentes formas, la Ec. [3] y la Ec. [5] correctas, en principio, para todas las situaciones, y la Ec. [4] que sólo es correcta para pendientes suaves (< 20 %).

Aunque los valores máximos con los que WISCHMEIER et al. (1958) experimentaron fueron de 192 m para la longitud de ladera y del 22 por 100

para la pendiente, no hay datos suficientes para establecer los límites de aplicabilidad de la ecuación (WISCHMEIER et al., 1978). Sin embargo, ha sido muy corriente encontrar en numerosas publicaciones la reproducción gráfica del efecto de la pendiente, deducida a partir de la expresión de WISCHMEIER et al. (1978) que permite la obtención del factor LS hasta para pendientes del 50 por 100. ISRAELSEN e ISRAELSEN (1982) han considerado que su expresión es válida hasta segmentos o pendientes uniformes del 100 por 100.

Por el contrario, han sido varios los autores que han puesto en duda la formulación tradicional del factor LS para pendientes severas. MCKENZIE y STUDLICK (1979) consideran que el mal uso de la USLE es debido a la estimación del factor LS para pendientes no uniformes y severas, especialmente en minas a cielo abierto sin restaurar. Para el caso de pendientes irregulares recomendamos la aplicación del método de FOSTER y WISCHMEIER (1974).

En la bibliografía aparecen diferentes formulaciones del factor S (cuadro 1):

**CUADRO 1**  
Formulaciones del factor S

Autor	Localidad	Formulación
Gilley et al., 1977.	North Dakota.	$S = 0,61 + 0,0435 s$ (para pendientes 5-17 %)
Singer y Blackard, 1982.	Contra Costa (Mollic Haploxeralf) y Hillgate (Typic Paleixeralf).	$S_{cc} = 0,22 + 9,37 \text{ sen } \theta - 8,43 \text{ sen}^2 \theta$ (pendientes de hasta el 40%). $S_H = -0,10 + 7,66 \text{ sen } \theta + 59,49 \text{ sen}^2 \theta - 101,65 \text{ sen}^3 \theta$ (pendientes de hasta el 50 %)
Stein et al., 1983.	Ayrshire (Typic Fragiudalf) y Solar Sources (Typic Hapludalf).	$S_A = 12,784 \text{ sen } \theta - 0,146$ $S_{ss} = 10,742 \text{ sen } \theta + 0,037$ (pendientes del 6-18 %)

Señalaremos que todas las expresiones son locales, por lo que queda limitada su capacidad de extrapolación, y que la formulación de SINGER y BLACKARD fue diseñada para pendientes superiores al 18 por 100, al considerarse que el factor S de WISCHMEIER y SMITH sobreestimaba la pérdida por erosión en pendientes acusadas.

Por último destacaremos que hay una interacción entre la erosionabilidad y la pendiente de la ladera: las regueras se forman principalmente en pendientes severas, y el tiempo de formación de las regueras y su tamaño influyen notoriamente en la pérdida de suelo y en su variabilidad temporal. Como la erosionabilidad varía con la profundidad y, a su vez, el suelo que queda ex-

puesto por la acción del reguero puede ser menos erosionable se puede producir una sobreestimación de las pérdidas producidas. Este podría ser el caso de los aportes de tierra vegetal suelta sobre otros materiales, en general menos erosionables, los cuales pueden verse expuestos al erosionarse el primer horizonte.

### 3.3. Factores de cultivo, manejo y prácticas de control de la erosión, C, P y VM

El factor C o de protección por la vegetación toma en áreas donde el suelo superficial y la vegetación han sido removidos el valor 1, en consecuencia, en áreas mineras o denudadas por obra civil, éste debe ser el valor a tomar. Existen métodos para calcular el factor C para terrenos con vegetación natural (WISCHMEIER et al., 1975). De forma general, al abordar el estudio de la influencia de la vegetación en el proceso erosivo hay que combinar varios efectos:

- I. Efecto de cubierta vegetal aérea.
- II. Efecto del malhojo y de la cubierta vegetal en contacto con la superficie.
- III. Efectos residuales de las prácticas de cultivo, vegetación y uso del suelo.

Cada tipo de efecto se cuantifica con un subfactor, de forma que el factor C se obtiene como producto de los tres subfactores.

El efecto de la cubierta vegetal aérea refleja la influencia de las hojas y ramas que no están en contacto con el suelo, al interceptar la gota de lluvia y reducir la energía erosiva de la lluvia. En general, la gota tendrá una menor velocidad terminal y, como consecuencia, una menor erosividad. La reducción de la erosividad de la lluvia es proporcional a la reducción de la energía cinética, que depende de la velocidad, y ésta es función del diámetro de la gota, de la intensidad de la lluvia y de la altura de caída. Para cuantificar el subfactor I hay que considerar la altura, cobertura y densidad de la vegetación (figura 2).

La tasa de erosión es inversamente proporcional al porcentaje de suelo desnudo expuesto. La cobertura superficial es mucho más efectiva que un porcentaje equivalente de cobertura vegetal aérea; esto es debido a que la energía de la gota

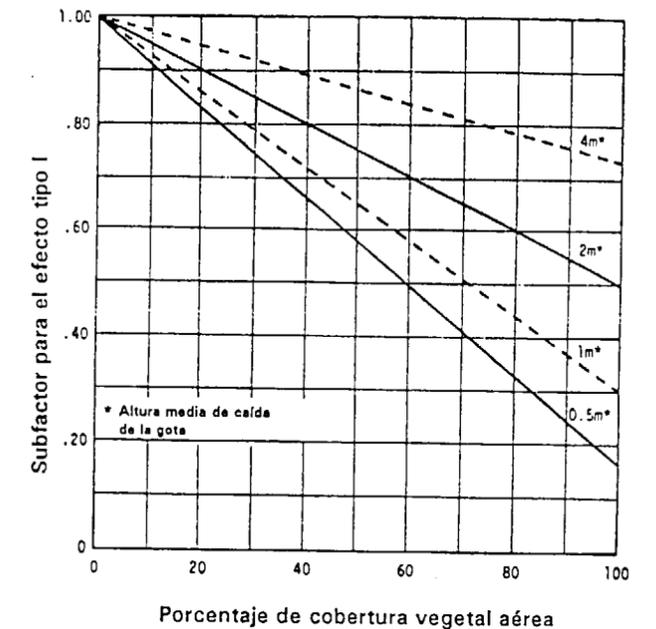


Figura 2

de lluvia se disipa al chocar contra el malhojo («mulching») y la cubierta vegetal en contacto con el suelo; y, probablemente, más importante es la reducción de la velocidad del agua que escurre y el aumento de la infiltración. En consecuencia, disminuye la capacidad de desprendimiento y transporte del flujo de escorrentía por el efecto de la rugosidad. Para la cuantificación del subfactor II hay que considerar el porcentaje de superficie efectiva (sin cubierta aérea encima) cubierta por el malhojo (figura 3).

Los suelos labrados son en general más erosionables que los no labrados al alterarse las características físicas. Asimismo, influye en la erosión el uso y las prácticas de cultivo anteriores. Otra característica a considerar, es la extensión, densidad y profundidad del sistema radicular, pues además de su efecto de trabazón, da origen a huecos y espacios libres que facilitan la percolación. En la cuantificación del subfactor III, para terrenos no agrícolas, se considera el porcentaje de raíces finas que existen en la superficie (figura 4).

Por otro lado, el factor P o factor de prácticas de conservación funciona de modo similar a los terrenos agrícolas, siendo éste uno de los fac-

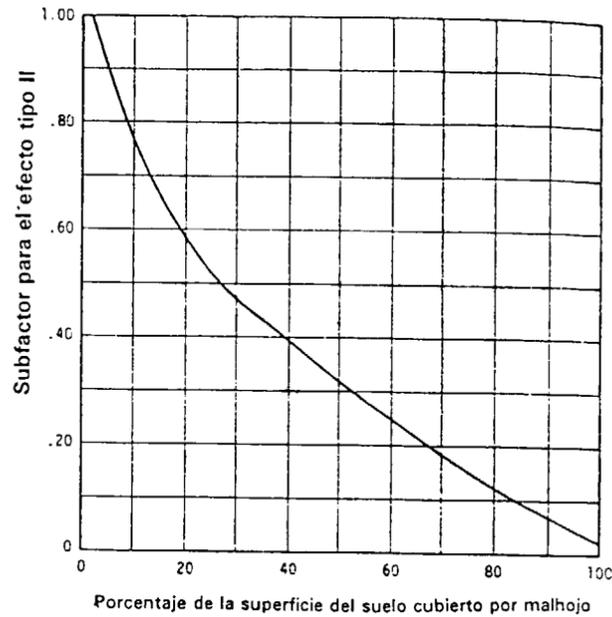


Figura 3

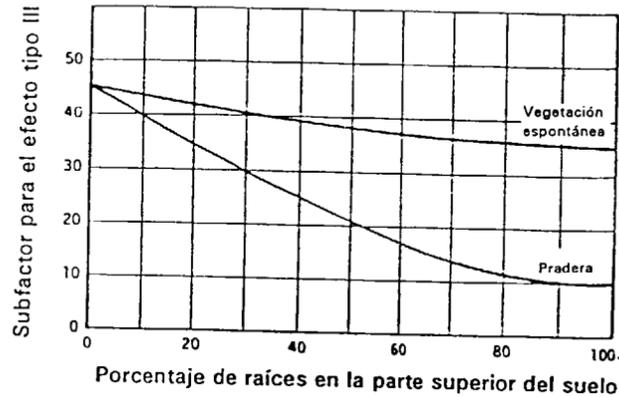


Figura 4

tores sobre el que más se puede incidir desde la planificación del diseño de escombreras cuando la restauración es considerada como objetivo final.

Consideramos que en determinados modelos de restauración en minería a cielo abierto, como por ejemplo el seguido en Mina Enma (Puertollano) o en las minas de MYTA (Mara), el proceso general completo de cálculo de los valores de

C y P según WISCHMEIER y SMITH, 1978, puede ser aplicado con toda normalidad en las áreas recuperadas para la agricultura.

En carreteras, y a raíz del National Cooperative Highway Research Program de los Estados Unidos, se adoptó un modelo de la USLE en el que los factores C y P se combinan en el factor VM o factor de control de la erosión (cuadro 2). ISRAELSEN et al. (1982) considera que puede hacerse extensivo a terrenos alterados por minería.

**CUADRO 2**  
**Valores habituales del factor VM**  
(ISRAELSEN et al., 1982)

<b>1. SUELO DESNUDO</b>	
Escarificado de 15 a 20 cm, reciente	1,00
Después de una lluvia	0,89
Suelto a 25 cm, liso	0,90
Suelto a 25 cm, rugoso	0,80
Compactado de arado con bulldozer de arriba abajo	1,30
Compactado de arado con bulldozer de arriba abajo, excepto raíces	1,20
Compactado de arado con bulldozer transversal	1,20
Compactado de arado con bulldozer transversal, excepto raíces	0,90
Rugoso arado irregularmente en todas las direcciones	0,90
Recién sembrado y abonado	0,64
Recién sembrado y abonado, a los seis meses	0,54
Sembrado fertilizado y doce meses de tratamiento químico	0,38
Costra de algas sin arar	0,01
Costra de algas con arado	0,02
Relleno compactado	1,24 - 1,71
Inalterado excepto en el arado	0,66 - 1,30
Escarificado únicamente	0,76 - 1,31
Capa escarificada de 5 cm de profundidad	0,61
<b>2. EMULSION ASFALTICA SOBRE SUELO DESNUDO</b>	
1,17 litros por m <sup>2</sup>	0,02
1,14 litros por m <sup>2</sup>	0,01 - 0,019
0,57 litros por m <sup>2</sup>	0,14 - 0,57
0,30 litros por m <sup>2</sup>	0,28 - 0,60
0,14 litros por m <sup>2</sup>	0,65 - 0,70
<b>3. POLVO PEGADO</b>	
0,57 litros por m <sup>2</sup>	1,05
1,14 litros por m <sup>2</sup>	0,29 - 0,78
<b>4. OTRAS APLICACIONES QUIMICAS</b>	
45 kg de fibra de vidrio con 0,14 a 0,56 l/m <sup>2</sup> de emulsión asfáltica	0,01 - 0,05
Aquatain	0,68

Acrospray 70, 10 % de la cubierta	0,98
Curasol AE	0,30 - 0,48
Petroset SB	0,40 - 0,66
PVH	0,71 - 0,90
Terra-Tack	0,66
Capa de virutas de madera recién proyectada de 0,11 kg/m <sup>2</sup>	0,05 - 0,75
Capa de virutas de madera recién proyectada de 0,16 kg/m <sup>2</sup>	0,01 - 0,36
Capa de virutas de madera recién proyectada de 0,40 kg/m <sup>2</sup>	0,009-0,1
Cemento Portland + Latex 0,11 kg/cm <sup>2</sup> + 0,008 l/m <sup>2</sup>	0,13
Cemento Portland + Latex 0,17 kg/cm <sup>2</sup> + 0,011 l/m <sup>2</sup>	0,006
<b>5. SIEMBRAS</b>	
Temporal de 0 a 60 días	0,40
Temporal de más de 60 días	0,05
Permanente de 0 a 60 días	0,40
Permanente de 2 a 12 meses	0,05
Permanente de más de 12 meses	0,01
<b>6. MATORRALES</b>	
	0,35
<b>7. CAPA DE VIRUTAS CON MALLA DE PLASTICO</b>	
	0,40 - 0,10
<b>8. MULCH (ver ISRAELSEN et al., 1982)</b>	

**3.4. Factor erosionabilidad del suelo, K**

La determinación del factor K, para la aplicación de la USLE en minería y obra civil, es fundamental para una cuantificación fidedigna de las pérdidas de suelo. La erosionabilidad del suelo es el principal escollo, por la falta de investigación, para que la USLE tenga aplicabilidad real en terrenos alterados.

Normalmente se hace siempre uso de la ecuación de regresión de WISCHMEIER y SMITH (1978):

$$100 K = [10^{-4} 2,71 M^{1,4} (12 - MO)] + 4,2 (E-2) + 3,2 (P-3) \quad [6]$$

Con K expresado en  $\frac{t \cdot m^2 \cdot h}{ha \cdot hectojulios \cdot cm}$

En donde:

M : Parámetro de textura de los 15 cm superficiales

$$M = (100 - Ac) \cdot (L + Armf)$$

$$L = Armf: \text{limo más arena muy fina } [0,1 - 0,002 \text{ mm}]$$

$$Ac: \text{arcilla } [< 0,002 \text{ mm}]$$

MO: Contenido en materia orgánica (%).  
E : Parámetro de estructura.  
P : Parámetro de permeabilidad.

En consecuencia, el factor K depende de la textura del suelo, el contenido en materia orgánica, la estructura y la permeabilidad. Sin embargo, existen aspectos físico-químicos que toman enorme peso en determinados suelos. Por ejemplo, el Fe<sup>3+</sup> en suelos ricos en este elemento, actúa como elemento anti-erosión; el Na<sup>+</sup>, en cambio, actúa en sentido contrario. Además, el factor de erosionabilidad del suelo así formulado ha recibido críticas, pues no considera contenidos en materia orgánica superiores al 4 por 100, el contenido en carbonatos, en yesos, el tipo de arcilla o la mayor o menor cantidad en elementos gruesos y la pedregosidad.

En escombreras de minería hay que prestar especial interés al contenido en elementos gruesos. Existen métodos para introducir la componente de los elementos gruesos en suelos agrícolas: unos introducen una modificación en el factor K (MCCORMACK et al., 1984), otros introducen una modificación en el factor C, asimilando el efecto de los elementos gruesos al de mulch (DISSMEYER y FOSTER, 1983; BOX y MEYER, 1984).

Aunque el nomograma, según sus autores, sirve para horizontes C o regolitos, y en consecuencia para superficies excavadas, se debería realizar una investigación a gran escala que correlacionase los aspectos físicos y químicos de los diferentes materiales susceptibles de erosionarse, con la erosionabilidad de la USLE, para poder así cuantificar de forma fidedigna la erosión. Asimismo, es necesario el considerar horizontes cerca de la superficie con cambios bruscos en su susceptibilidad a la erosión o la aparición de horizontes impermeables.

**4. CONCLUSION**

El análisis racional del proceso de degradación por erosión y su contraste experimental es imprescindible para el establecimiento de las medidas de conservación. Es necesaria la investigación de campo con el fin de evaluar los factores de la USLE para cada condición local, lo que per-

mite comprender mejor el proceso erosivo y su aplicación para la resolución de los problemas de conservación de suelos. La investigación de la erosionabilidad, del factor S en pendientes acusadas, que son las que encontramos en los taludes de escombreras y en obras civiles, y la investigación de los factores C y P (o factor VM), que interesan especialmente a la ingeniería, preocupada hoy por las cuestiones ambientales, es fundamental para conservar los taludes de minería y obras civiles y disminuir su impacto ambiental.

#### REFERENCIAS

- ALMOROX, J. (1993): *La erosión hídrica en un ambiente mediterráneo. Discusión metodológica y aplicación al término de Alcalá del Valle*. Tesis Doctoral. E.T.S. Ingenieros Agrónomos.
- ALMOROX, J.; SAA, A.; ANTONIO, R., y GASCO, J. M. (1992): *Aplicación del factor de Fournier modificado para la estimación de la erosividad*. III Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pamplona.
- ARRANZ, J. C. (1991): *Ingeniería de diseño y tecnologías para la mitigación de la erosión en taludes excavados*. I Bienal Española de Ingeniería Geológica y Minera. Tomo II. Madrid.
- ASENSIO, E.; NICOLAU, J. M., y PUIGDEFABREGAS, J. (1992): *Un modelo preliminar de erosión hídrica superficial en taludes de escombreras*. III Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. La Coruña. Pp. 791-802.
- BOX, J. E., y MEYER, L. D. (1984): *Adjustment of the Universal Soil Loss Equation for Cropland Soils Containing Coarse Fragments*. En *Erosion and Productivity of Soils Containing Rock Fragments*. SSSA Special Publication Number 13. Soil Science Society of America, pp. 83-90. Madison.
- DISSMEYER, G. E., y FOSTER, G. R. (1983): *Modifying the universal soil loss equation for forest land*. En *Soil Erosion and Conservation*. Editado por S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer y Andrew Lo. Soil Conservation Society of America. Iowa. Pp. 480-495.
- GILLEY, J. E.; GEE, G. W.; BAUER, A.; WILLIS, W. O., y YOUNG, R. A. (1977): *Runoff and Erosion Characteristics of Surface-Mined Sites in Western North Dakota*. Transactions of the ASAE, pp. 697-700, 704.

ISRAELSEN, C. E., e ISRAELSEN, E. K. (1982): *Controlling Erosion on Surface Mining Sites*. 1982 Symposium of Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation, pp. 329-337.

MCCORMACK, D. E.; YOUNG, K. K., y DARBY, G. M. (1984): *Rock Fragments and the K Factor of the Universal Soil Loss Equation*. En *Erosion and Productivity of Soils Containing Rock Fragments*. SSSA Special Publication Number 13. Soil Science Society of America, pp. 73-81. Madison.

MCKENZIE, G. D., y STUDLICK, J. R. J. (1979): *Erodibility of surface-mine spoil banks in southeastern Ohio: An approximation*. Journal of Soil and Water Conservation, 1979, pp. 187-189.

NAS-NAE (1973): *National Cooperative Highway Research Program. Erosion control on highway construction*. Highway Research Board.

NASCIMENTO, V., y CASTRO, E. (1974): *Preventive measures against slope erosion. Criteria for soil selection*. In Proceedings of the Second Int. Congress of the I.A.E.G. Sao Paulo, Brazil.

SINGER, M. J., y BLACKARD, J. (1982): *Slope Angle-Interrill Soil Loss Relationships for Slopes up to 50 %*. Soil Science Society of America Journal, vol. 46, pp. 1270-1273.

STEIN, O. R.; ROTH, C. B.; MOLDENHAUER, W. C., y HAHN, D. T. (1983): *Erodibility of Selected Indiana Reclaimed Strip Mined Soils*. 1983 Symposium on Surface Mining, Hydrology, Sedimentology and Reclamation, pp. 101-106.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D., y UHLAND, R. E. (1958): *Evaluation of factors in the Soil-Loss Equation*. Agricultural Engineering, 39, and Transactions of the ASAE, vol. 1, núm. 1. Michigan, pp. 458-462, 474.

WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C. B., y CROSS, B. V. (1971): *A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites*. J. Soil and Water Conservation, núm. 26, pp. 189-193.

WISCHMEIER, W. H. (1975): *Estimating the soil loss equation's cover and management factor for undisturbed areas*. Agricultural Research Service. USDA. ARS-S-40. Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources, pp. 118-124.

WISCHMEIER, W. H. (1976): *Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation*. Journal of Soil and Water Conservation, vol. 31, núm. 1, pp. 5-9.

WISCHMEIER, W. H., y SMITH, D. D. (1978): *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. USDA, SEA/AR, Agr. Handbook, núm. 537. Washington DC, 58 pp.

Original recibido: Agosto de 1993.  
Original aceptado: Septiembre de 1993.

## ROCAS INDUSTRIALES Y ORNAMENTALES

# Las piedras de construcción de la Seu Vella de Lérida: Tipos, petrografía y propiedades físicas.

Por F. J. ALONSO (\*\*), J. S. CHINCHON (\*), J. ORDAZ (\*\*), E. HERNANDEZ (\*), A. ALASTUEY (\*) y R. M. ESBERT (\*\*)

#### RESUMEN

Se estudian los principales materiales pétreos de construcción de la antigua catedral (Seu Vella) de Lérida (Cataluña, España): una arenisca («piedra de Lérida») y una dolomía («piedra de Vinaixa»). Se analiza su composición mineralógica y sistema poroso, así como algunas propiedades físicas directamente relacionadas con el movimiento de los fluidos y el deterioro de las piedras (absorción de agua, por inmersión y succión capilar, y permeabilidad al vapor de agua). Se constata asimismo que la relación feldespato/caolinita en muestras de areniscas del monumento, procedentes de sillares colocados en emplazamientos con la misma orientación, disminuye cuanto más antigua es su época de colocación.

**Palabras clave:** Arenisca, Dolomía, Petrografía, Sistema poroso, Propiedades físicas, Piedra de construcción, Lérida, España.

#### ABSTRACT

The main building stones used in the construction of the ancient cathedral (Seu Vella) of Lérida (Catalonia, Spain), —a sandstone («Lérida stone») and a dolomite («Vinaixa stone») — are studied. The mineralogical composition and pore system are analyzed, as well as some physical properties directly linked to the fluids movement and stone deterioration (water absorption, by immersion and capillary suction, and water vapour permeability). It is also verified that the feldspar/caolinite ratio in sandstone samples of the monument, from blocks placed with the same orientation, decreases as much older is the age of its placing.

**Key words:** Sandstone, Dolomite, Petrography, Pore system, Physical properties, Building stone, Lérida, Spain.

#### 1. INTRODUCCION

La antigua catedral de Lérida, conocida como la Seu Vella, está construida con diferentes materiales rocosos. Macroscópicamente se distinguen tres tipos litológicos; de ellos los más utilizados y representativos del monumento son: una arenisca, procedente en gran parte de Gardeny, en las inmediaciones de la capital («piedra de Lérida»); y una roca carbonatada, similar a la que se extrae en la actualidad en las canteras de Les Garrigues («piedra de Vinaixa» o de «La Floresta»). Ambas variedades constituyen la casi totalidad del edificio, y corresponden a las eta-

pas constructivas más antiguas (siglos XIII-XIV) de transición del románico al gótico (p. ej. LARA PEINADO, 1977). El tercer tipo, cuantitativamente poco relevante, corresponde a otra roca carbonatada, conocida por «piedra de Aragón» o «piedra rubia de Huesca», que ha sido empleada en labores de restauración (años sesenta de este siglo), especialmente en la torre-campanario. La procedencia exacta de esta piedra no ha podido ser determinada (figs. 1 a 4).

En el presente trabajo se estudian los principales materiales rocosos de la Seu Vella, desde el punto de vista petrográfico y mineralógico. Asimismo se analizan sus características porométricas y se determinan las propiedades físicas más estrechamente ligadas al paso de fluidos por su interior. Estas propiedades hídricas son de

(\*) Instituto de Ciencias de la Tierra «Jaime Almera». CSIC. Barcelona.

(\*\*) Dpto. de Geología (Petrología). Univ. de Oviedo.

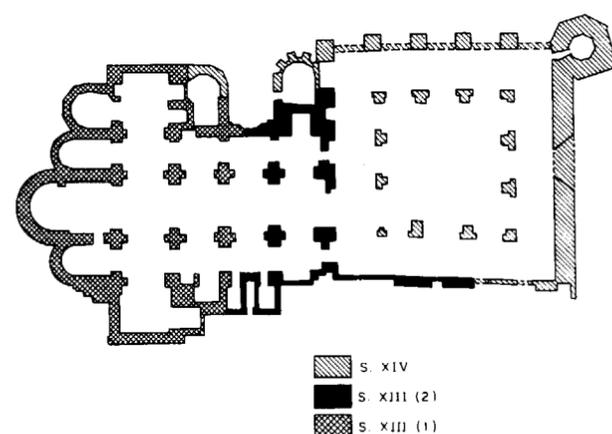


Figura 3.—Esquema en planta de la Seu Vella en la que se indican las épocas de construcción.

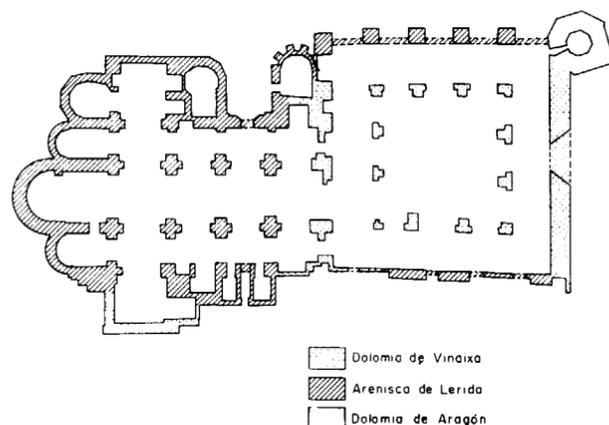


Figura 4.—Esquema en planta de la Seu Vella con la distribución de las litologías utilizadas en su edificación.

gran interés tanto para el estudio del deterioro actual de dichos materiales, como en la valoración de la eficacia de eventuales tratamientos de conservación.

## 2. MATERIALES ROCOSOS

### 2.1. Características petrográficas

Se describen a continuación las dos principales variedades litológicas de la Seu Vella («Lérida» y «Vinaixa»). La llamada piedra de Aragón no ha podido ser caracterizada desde el punto

de vista petrográfico y físico por carecer de material suficiente. En consecuencia, sólo se han podido realizar los análisis difractométricos.

*Piedra de Lérida.*—Arenisca con cemento carbonatado, de color pardo grisáceo, aspecto granudo más o menos fino, y relativamente homogénea, compacta y coherente. Es de edad oligocena (IGME, 1971).

Al microscopio óptico de polarización se distingue la textura granuda, detrítica, grano-soportada. El tamaño de los granos se sitúa entre 200 y 300  $\mu\text{m}$ . Destaca el cuarzo, normalmente limpio, a veces fisurado, y de formas angulosas. También son frecuentes los feldespatos (microclina y plagioclasas) y fragmentos de rocas (areniscas de grano fino y limolitas). Otros componentes terrígenos observados son las biotitas, más o menos alteradas, y algunas moscovitas. Sobresale, asimismo, la presencia de granos carbonatados, entre los que pueden distinguirse agregados de micrita (calcita microcristalina) y de microesparita, así como granos de esparita, formados por un único cristal de calcita (fig. 5).

El empaquetamiento entre los granos es muy elevado, con deformación de los más blandos y recristalización de los de naturaleza carbonatada. En general es difícil observar la existencia de fases de unión entre ellos. No obstante, cabe destacar la existencia de cemento carbonatado que, en algunos granos de esparita, se presenta en continuidad óptica. Al microscopio se observan algunos poros móldicos, de tamaño similar al de los granos, relacionados posiblemente con procesos de degradación de arcillas o disolución de carbonatos. También cabe destacar la presencia de porosidad matricial asociada a micrita.

*Piedra de Vinaixa.*—Roca carbonatada, de color pardo grisáceo, aspecto de finamente granudo a microcristalino, muy homogénea, compacta y coherente. Su edad es también oligocena (IGME, 1980); (ESBERT et al., 1989).

Los minerales mayoritarios son la dolomita y la calcita; observándose también algunos granos de cuarzo. La textura es granuda, aparentemente detrítica, predominando los espacios vacíos en las zonas intergranulares. Los granos están formados por cristales únicos (espáticos) y agregados microcristalinos (micríticos), tanto de calcita como de dolomita. Los distintos tipos de

Figura 1.—Vista parcial de la Seu (Puerta de los Infantes). Pueden distinguirse la arenisca de Lérida y la dolomía de Vinaixa (más clara).



Figura 2.—Vista de la Torre-Campanario, en la que se distingue, en color claro, la piedra de Aragón.

Figura 1.—Vista parcial de la Seu (Puer-  
ta de los Infantes). Pueden distinguirse  
la arenisca de Lérida y la dolomía de  
Vinaixa (más clara).

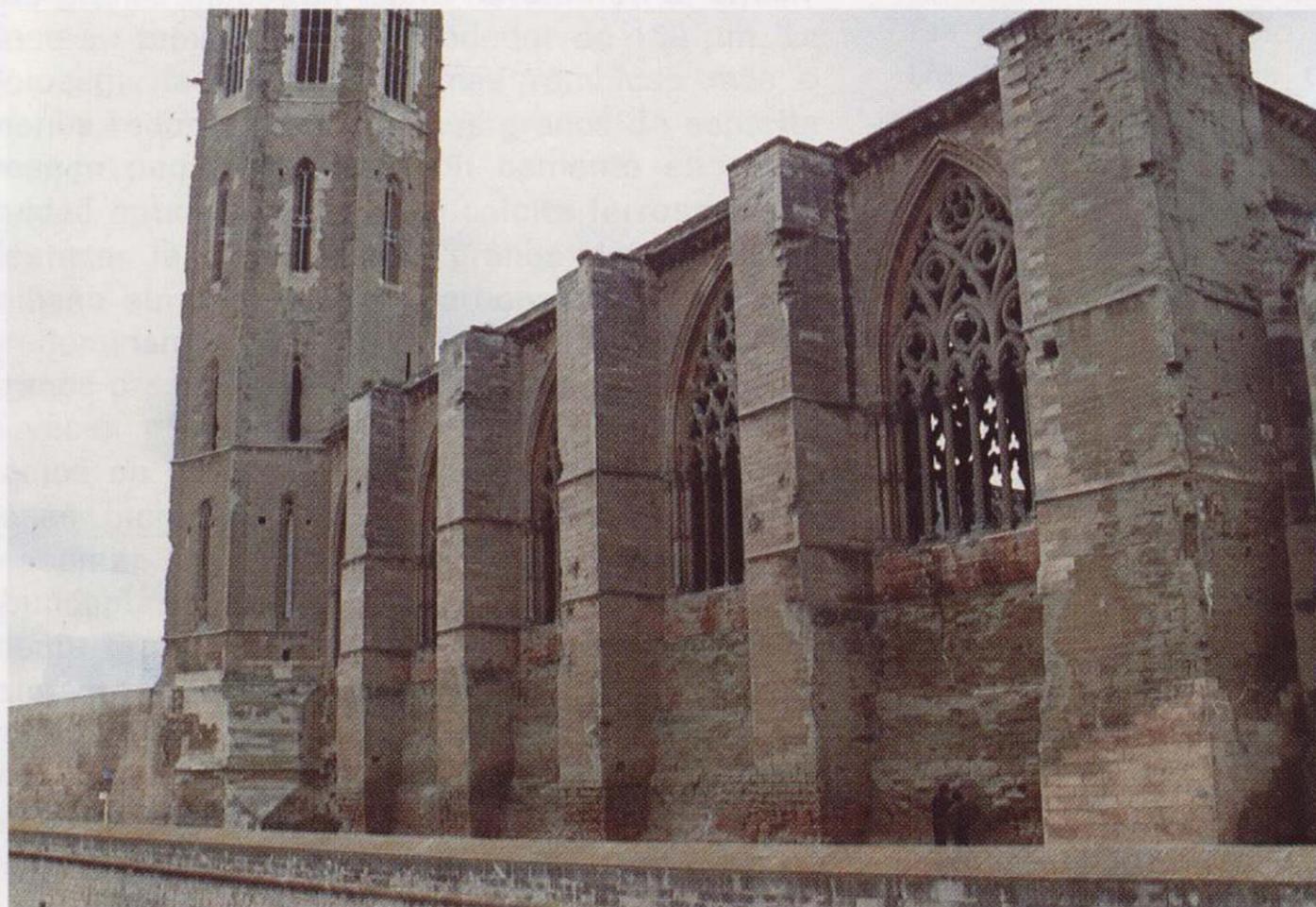
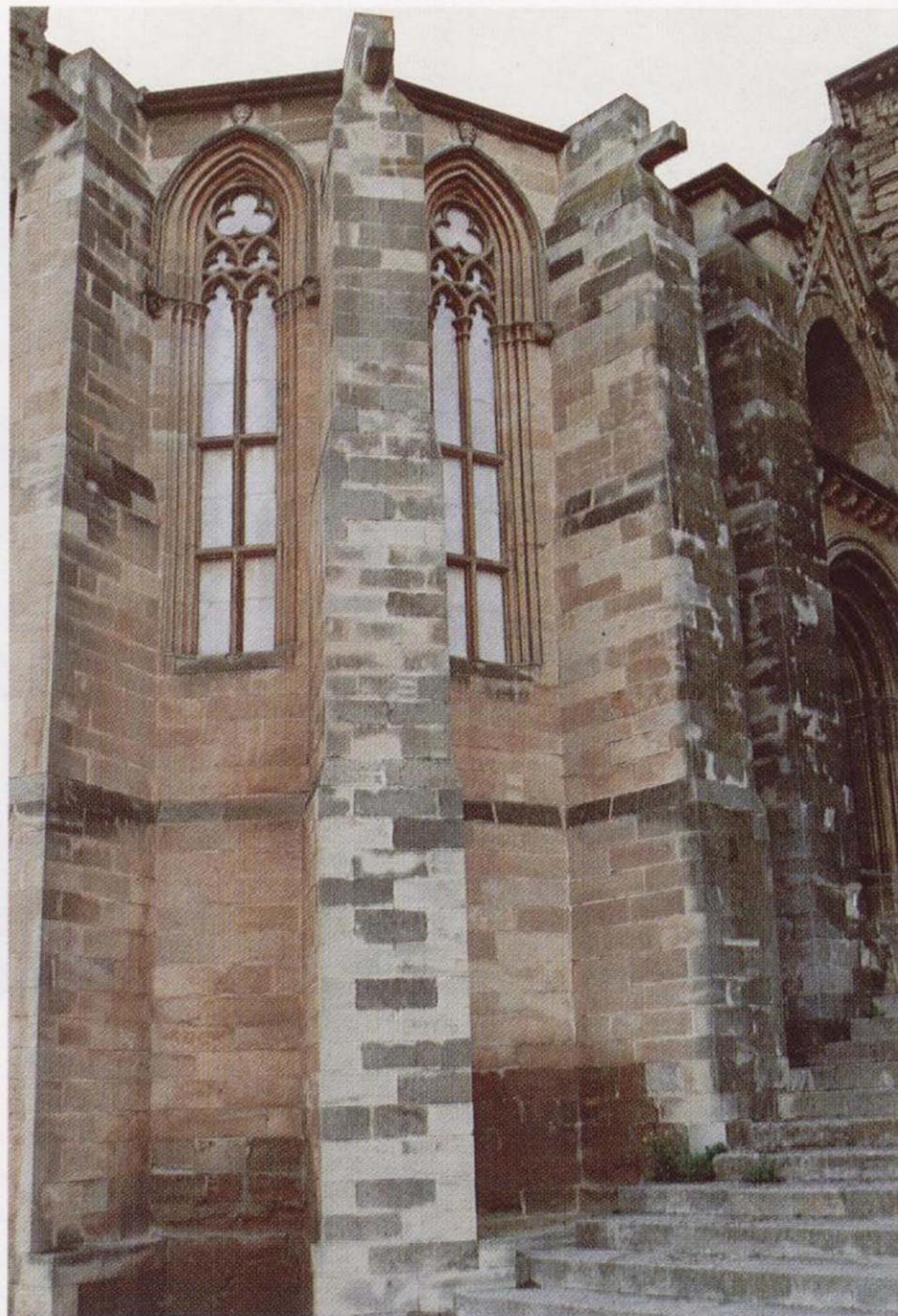


Figura 2.—Vista de la To-  
rre-Campanario, en la que  
se distingue, en color cla-  
ro, la piedra de Aragón.



Figura 5.—Aspecto al microscopio de polarización de la arenisca de Lérida. NC×100. Destaca la abundancia de carbonatos, formando granos de micrita (1) junto con granos y cemento de esparita (2), así como granos de cuarzo (3) y minerales arcillosos (4).

granos (esparita, micrita, doloesparita y dolomicroesparita) se presentan en parecidas proporciones. Excepcionalmente se observan algunos fragmentos de fósiles (fig. 6).

Los granos muestran ligera heterometría, situándose su tamaño medio alrededor de  $150 \mu\text{m}$ . La doloesparita presenta formas rómbicas más o menos redondeadas. Algunos granos de esparita poseen pequeñas orlas con cemento en continuidad óptica, formado por calcita ferrosa. Cabe destacar la presencia de granos de cuarzo de tamaño similar a los de carbonato y de formas predominantemente angulosas. Normalmente los granos presentan contactos más o menos largos, a veces puntuales, predominando los espacios vacíos en las zonas intergranulares. En algunas zonas dichos espacios intergranulares pueden presentar cemento carbonatado. La roca posee abundantes espacios vacíos, de tamaño relativamente grande ( $50 \mu\text{m}$ ), que se sitúan fundamentalmente en posiciones intergranulares, como ya se ha indicado. Cabe destacar la existencia de otro tipo de porosidad, de tamaño mucho más fino, localizada en el interior de los granos micríticos, así como en los cristales de dolomita.

## 2.2. Análisis difractométricos

*Procedimiento.*—Con el fin de analizar, por medio de técnicas difractométricas (DRX), la composición mineral de los materiales rocosos de la Seu Vella, se tomaron muestras en distintas partes del edificio (fachadas, capillas, etc.). De cada muestra se obtuvieron unos 5 g. El muestreo se hizo en todos los casos a una altura aproximada de 2,5 m., para evitar las sales solubles que en muchos casos se van formando por efecto de la succión capilar.

Las muestras, una vez secas y pulverizadas hasta un tamaño medio de 40 micras, se analizaron en un difractómetro de polvo Siemens D-500, con monocromador de grafito y detector de centelleo. Se utilizó la radiación  $\text{Cu K}\alpha$ .

En primer lugar se efectuó un barrido entre 4 y 60 grados de  $2\theta$  para todas las muestras, resultando que estaban formadas por todos o algunos de los siguientes minerales: calcita, dolomita, cuarzo, feldespato, yeso, illita y caolinita.

Para realizar el análisis cuantitativo se ha aplicado el método de Relación de Intensidades, cuya formulación teórica se debe a CHUNG



Figura 6.—Aspecto al microscopio de polarización de la dolomía de Vinaixa NC×100. Pueden observarse cristales de dolomita (1), junto a agregados micríticos (2), y la abundancia de poros intercrystalinos (3).

(1974a y b), y que se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Subíndices} \left\{ \begin{array}{l} I_1/I_2 = (K_1/K_2) \cdot (X_1/X_2) \\ \sum X_i = 100 \end{array} \right.$$

siendo I la intensidad difractada por una fase para una reflexión determinada, X la concentración de esa fase en la muestra y K una constante calculada experimentalmente utilizando un compuesto patrón al 50 % en peso.

TABLA I

Composición mineralógica media (%) de las litologías de la Seu Vella

	Arenisca de Lérida	Dolomía de Vinaixa	Dolomía de Aragón
Calcita... ..	34	24	6
Dolomita ... ..	4	66	40
Cuarzo... ..	23	9	18
Feldespatos.. ..	19	—	21
Illita ... ..	11	—	9
Caolinita ... ..	7	—	6

**Resultados.**—En la tabla I se refleja la composición mineralógica media de las tres litologías descritas. En la elaboración de estos promedios se han tenido en cuenta, además de los análisis de muestras de piedras del edificio, otros correspondientes a materiales situados en el afloramiento cercano al monumento (similares a la piedra de Lérida) y de las canteras de Vinaixa actualmente en explotación. No se incluyen las pequeñas cantidades de yeso detectadas en algunas de las muestras analizadas.

De acuerdo con estos resultados, la arenisca de Lérida se halla compuesta en más de un 40 por 100 por granos terrígenos (23 % de cuarzo y 19 % de feldespatos). Los minerales arcillosos se acercan al 20 por 100 (11 % de illita y 7 % de caolinita); y los componentes carbonatados constituyen el 38 por 100 (34 % de calcita y 4 % de dolomita).

La dolomía de Vinaixa tiene un 90 % de carbonato, y una relación dolomita/calcita de 2.75. No se detectan feldespatos ni arcillas en proporciones significativas.

La dolomía de Aragón, por último, presenta un porcentaje medio en carbonatos del 46 %, y una

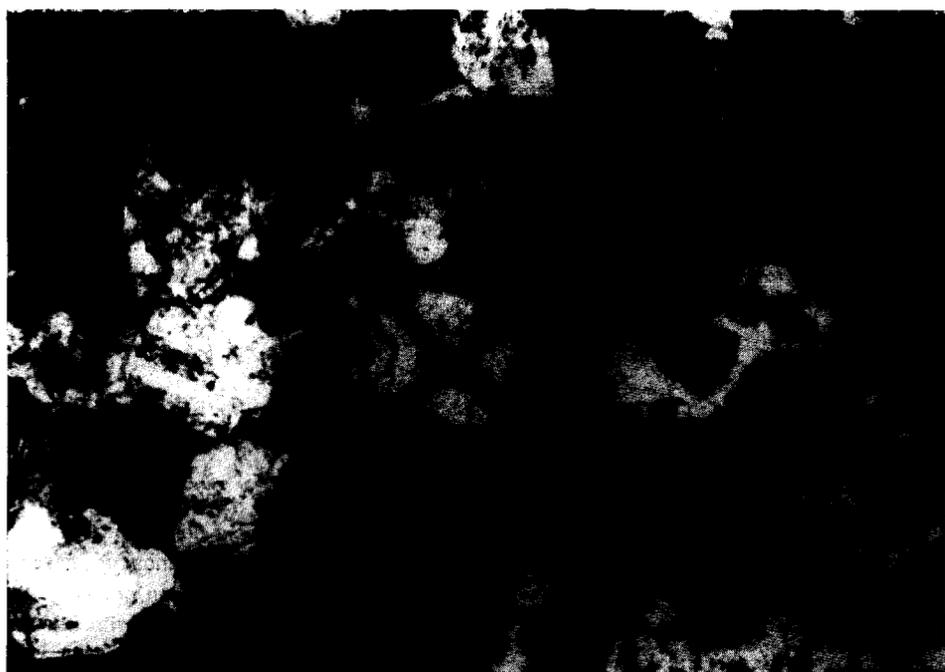


Figura 6.—Aspecto al microscopio de polarización de la dolomía de Vinaixa NC×100. Pueden observarse cristales de dolomita (1), junto a agregados micríticos (2), y la abundancia de poros intercrystalinos (3).

(1974a y b), y que se basa en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Subíndices } \left\{ \begin{array}{l} I_1/I_2 = (K_1/K_2) \cdot (X_1/X_2) \\ \sum X_i = 100 \end{array} \right.$$

siendo I la intensidad difractada por una fase para una reflexión determinada, X la concentración de esa fase en la muestra y K una constante calculada experimentalmente utilizando un compuesto patrón al 50 % en peso.

TABLA I

Composición mineralógica media (%) de las litologías de la Seu Vella

	Arenisca de Lérida	Dolomía de Vinaixa	Dolomía de Aragón
Calcita...	34	24	6
Dolomita ...	4	66	40
Cuarzo...	23	9	18
Feldespato..	19	—	21
Illita ...	11	—	9
Caolinita ...	7	—	6

**Resultados.**—En la tabla I se refleja la composición mineralógica media de las tres litologías descritas. En la elaboración de estos promedios se han tenido en cuenta, además de los análisis de muestras de piedras del edificio, otros correspondientes a materiales situados en el afloramiento cercano al monumento (similares a la piedra de Lérida) y de las canteras de Vinaixa actualmente en explotación. No se incluyen las pequeñas cantidades de yeso detectadas en algunas de las muestras analizadas.

De acuerdo con estos resultados, la arenisca de Lérida se halla compuesta en más de un 40 por 100 por granos terrígenos (23 % de cuarzo y 19 % de feldespato). Los minerales arcillosos se acercan al 20 por 100 (11 % de illita y 7 % de caolinita); y los componentes carbonatados constituyen el 38 por 100 (34 % de calcita y 4 % de dolomita).

La dolomía de Vinaixa tiene un 90 % de carbonato, y una relación dolomita/calcita de 2.75. No se detectan feldespatos ni arcillas en proporciones significativas.

La dolomía de Aragón, por último, presenta un porcentaje medio en carbonatos del 46 %, y una

relación dolomita/calcita de 6.66. El resto lo constituyen cuarzo (18 %), feldespatos (21 %), y minerales arcillosos (9 % de illita y 6 % de caolinita).

A la vista de estos resultados, y cotejando la ubicación de las litologías en el monumento con las distintas épocas de construcción, puede concluirse que, en términos generales, se utilizaron en primer lugar las areniscas situadas en la propia base de la Seu, recurriendo posteriormente a material calcáreo similar a las dolomías que actualmente son extraídas de las canteras de Vinaixa.

### 2.3. Relación feldespato/caolinita en la arenisca

Existen diferentes partes del monumento, construidas en distintas épocas, en las que se empleó el mismo tipo de piedra. Así, en la capilla de San Erasmo (1220), capilla de la Asunción (1290) y portada de la Antecala Capitular (1360) se utilizó la arenisca de Lérida. Sucede, además, que estas tres unidades tienen la misma orientación, y por lo tanto hay que suponer, en principio, una actuación parecida de los agentes de alteración sobre las piedras de este sector. Esta situación permite la realización de análisis comparativos del grado de alteración mineral alcanzado por las distintas piedras. En este sentido, es interesante constatar, por ejemplo, que la relación feldespato/caolinita en las distintas areniscas de dichas unidades disminuye conforme

TABLA II  
Relación feldespato/caolinita en la arenisca de Lérida

Muestra	Año constr.	Feldesp. (%)	Caolinita (%)	Relac.: Fel/cao.
Capilla de S. Erasmo ...	1220	19,3	5,9	3,27
Capilla de la Asunción...	1290	21,1	6,0	3,50
Antecala Capitular..	1360	25,5	6,4	3,98

más antigua es su época de colocación en el edificio, según puede verse en la tabla II. Así pues, la citada relación podría tomarse como un indicador de la datación relativa de la puesta en obra de este material pétreo en determinadas partes del monumento.

### 3. PROPIEDADES FISICAS

Se ha determinado una serie de propiedades físicas, dependientes de las características del sistema poroso de las piedras y directamente relacionadas con la captación y movimiento de los fluidos, principalmente el agua, por el interior de las mismas.

Estas propiedades juegan un papel fundamental en los procesos de alteración, así como en la valoración de la eficacia de eventuales tratamientos aplicados a las piedras para su consolidación o protección.

**Propiedades determinadas.**—Los ensayos hídricos llevados a cabo han sido los siguientes:

- Absorción de agua al vacío.
- Absorción de agua por inmersión total.
- Desorción de agua: evaporación.
- Absorción de agua por capilaridad.
- Permeabilidad al vapor de agua.

A partir de dichos ensayos se han determinado diferentes parámetros:

- Contenido en agua en saturación ( $W_s$ ).
- Contenido en agua (W) en función del tiempo, en absorción.
- Grado de saturación (S) en función del tiempo, en desorción.
- Coeficiente de capilaridad (C).
- Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua ( $K_v$ ).

Los ensayos se han realizado con muestras de cantera de la arenisca de Lérida y la dolomía de Vinaixa. Para la determinación de las propiedades físicas citadas se han seguido las sugerencias de la RILEM (1980) y las normas del ICR (Instituto Centrale del Restauro).

**Resultados obtenidos.**—En la tabla III se muestran los resultados correspondientes al contenido en agua en saturación, coeficiente de capi-

laridad y coeficiente de permeabilidad al vapor de agua. Cabe señalar que dichos valores son relativamente próximos en ambos tipos rocosos,

**TABLA III**  
**Propiedades físicas**

Variedad rocosa	Contenido en agua en saturac. (%) Ws	Coef. capilaridad Kg/m <sup>2</sup> · h <sup>1/2</sup> C	Coef. permeabil. (g/m <sup>2</sup> · 24h · mmHg) Kv
Lérida ... ..	5,7	2,4	6,5
Vinaixa... ..	7,1	7,5	5,2

siendo los de Ws y C superiores y los de Kv inferiores en la dolomía de Vinaixa.

En las figuras 7 y 8 se representan las curvas de absorción y desorción (evaporación) de agua. En el primer caso se expone la variación del contenido en agua, y en el segundo el grado de saturación con respecto al tiempo. El comportamiento cinético durante la absorción libre de agua es similar en ambas piedras, si bien la dolomía de Vinaixa presenta siempre valores supe-

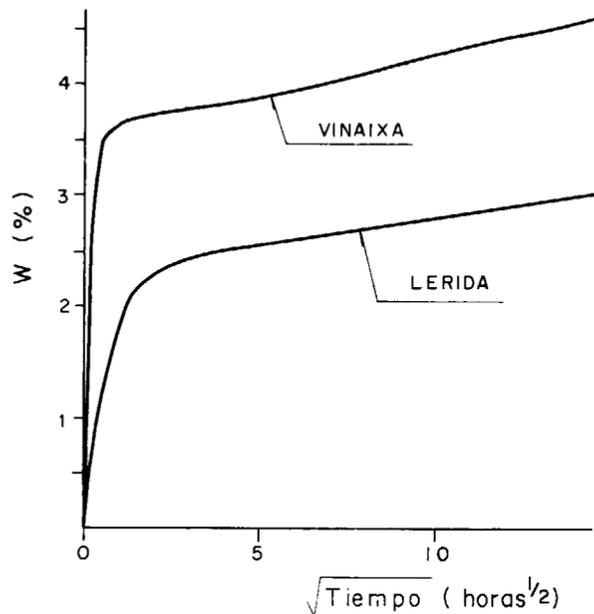


Figura 7.—Curvas de absorción de agua por inmersión total: evolución del contenido en agua, con respecto a la raíz cuadrada del tiempo en las piedras de Lérida y Vinaixa.

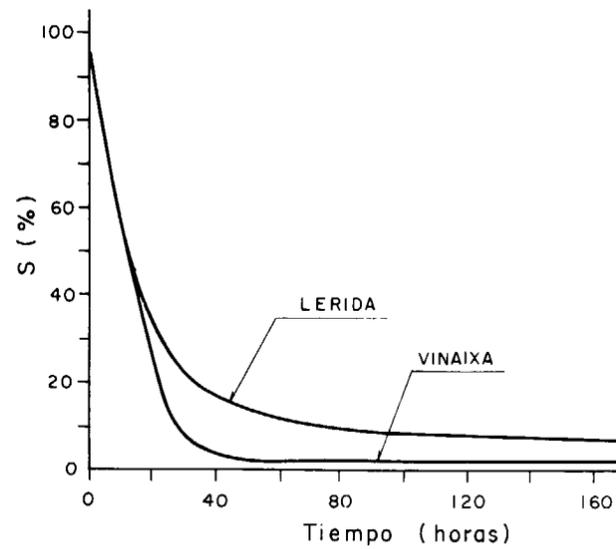


Figura 8.—Curvas de evaporación: evolución de la pérdida en agua con respecto al tiempo.

riores para el contenido en agua y grado de saturación. Así, los valores obtenidos al cabo de dos días de ensayo son de 4 por 100 para el contenido en agua de Vinaixa y 2,6 por 100 para el de Lérida, lo que representa un 46 por 100 para el grado de saturación en el primer caso y un 56 por 100 en el segundo. Durante el secado el comportamiento es también similar, situándose siempre por delante la dolomía de Vinaixa en cuanto a su capacidad de secado: menores contenidos en agua y menores grados de saturación. Ambas piedras retienen algo de agua, en especial la de Lérida.

La figura 9 corresponde a la absorción de agua por capilaridad. En este caso se muestra la variación de peso por unidad de superficie en contacto con el agua, en función de la raíz cuadrada del tiempo. Los coeficientes de capilaridad obtenidos presentan las diferencias más notables. Así, por ejemplo, en la dolomía de Vinaixa dicho coeficiente es unas tres veces mayor que en la arenisca de Lérida.

**4. CARACTERISTICAS POROMETRICAS**

Los movimientos del agua a través de las piedras dependen, fundamentalmente, de la configuración del sistema poroso, es decir del tamaño

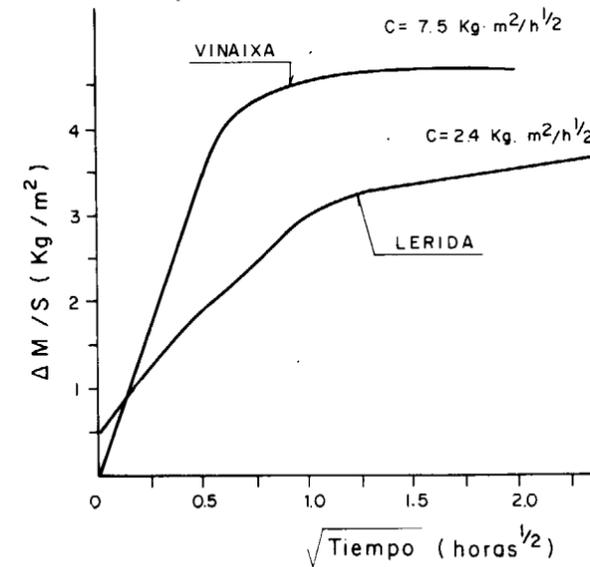


Figura 9.—Curvas de absorción de agua por capilaridad. Se relaciona la variación de peso por unidad de superficie en función de la raíz cuadrada del tiempo.

y forma de los poros y de los conductos de comunicación entre ellos. En este sentido, y con el fin de obtener información sobre las características del sistema poroso y la distribución del tamaño de los poros de los materiales estudiados, se han utilizado técnicas de porosimetría de inyección de mercurio.

**Procedimiento de ensayo.**—Como es sabido, el ensayo consiste en introducir mercurio a presión en el sistema poroso de las rocas, determinándose el volumen que ha penetrado en cada nivel de presión. De acuerdo con el rango de presiones suministradas por el equipo, el rango de poros explorados se sitúa entre 70 y 0.0035 μm, considerándose microporos los poros con radios de acceso inferiores a 7,5 μm. Los ensayos han sido llevados a cabo con un equipo Carlo Erba (Series S-120 y S-200), sobre muestras cilíndricas de 12 mm de diámetro, realizándose dos inyecciones consecutivas. De esta manera se ha cuantificado, también, la fracción del volumen de poros que queda impregnada por mercurio de forma permanente (porosidad «atrapada»).

Los principales parámetros obtenidos a partir de estos ensayos han sido los siguientes:

— Porosidad abierta o efectiva.

- Porosidad atrapada.
- Microporosidad.
- Tamaño medio de poro.

**Resultados obtenidos.**—En la tabla IV se muestran los valores porométricos obtenidos, y en la figura 10 las curvas de distribución del tamaño de los poros. Puede observarse que las diferencias en cuanto a porosidad abierta, porosidad atrapada y microporosidad no son muy acusadas, si bien en todos los casos la dolomía de Vinaixa presenta valores ligeramente superiores. Las mayores diferencias se sitúan en la posición de la curva de distribución, lo cual guarda relación en el tamaño de acceso a los poros. Así, la dolomía de Vinaixa presenta tamaños alrededor de tres veces mayores que la arenisca de Lérida, tal como puede observarse en dicha tabla IV.

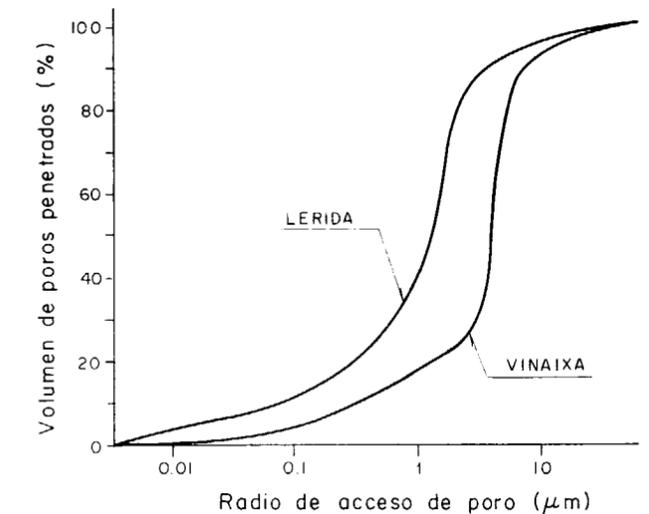


Figura 10.—Curvas de distribución del tamaño de poros.

**TABLA IV**  
**Parámetros del sistema poroso**

Variedad rocosa	Porosidad abierta n <sub>o</sub> (%)	Porosidad atrapada (%)	Microporosidad (%)	Radio medio de poro (μm)
Lérida...	14,4	10,6	12,9	1,2
Vinaixa...	14,8	11,5	14,3	3,8

## 5. CONCLUSIONES

Se han utilizado métodos petrográficos y de DRX para obtener información cualitativa y cuantitativa de la composición mineralógica de los materiales pétreos empleados en la construcción de la Seu Vella de Lérida. Los dos materiales rocosos mayoritarios y más antiguos son una arenisca procedente de las inmediaciones de Lérida capital; y una dolomía, similar a la que se extrae actualmente de las canteras de Vinaixa.

En líneas generales, la información obtenida a partir de los resultados de los análisis de las muestras concuerda con la que se extrae de la documentación de tipo histórico. Así, tomando como ejemplo tres capillas de la Seu con la misma orientación, perfectamente datadas y construidas con el mismo tipo de piedra arenisca, se ha comprobado que la relación feldespato/caolinita disminuye a medida que la construcción es más antigua. Este tipo de relación: mineral primario/mineral de neoformación puede servir, en este caso, como un posible método de datación relativa para zonas del monumento construidas con el mismo tipo de piedra e igualmente orientadas.

Las propiedades hídricas de ambos tipos de piedra son similares. Sin embargo, la dolomía de Vinaixa presenta una distribución de los tamaños de los poros algo distinta, con radios de acceso mayores. Esto hace que la absorción de agua (sobre todo por succión capilar) y la velocidad de evaporación sean sensiblemente mayores en este material rocoso que en la arenisca de Lérida.

Por otro lado, el contenido de arcillas en la arenisca de Lérida, especialmente de illita, condiciona de forma significativa su deterioro (mayor en términos comparativos que el manifestado por la dolomía de Vinaixa en condiciones similares), favoreciendo la acción físico-química de los agentes de alteración y propiciando la aparición de las formas de alteración más generalizadas

en la arenisca, tales como alveolización y desagregación granular (arenización) (ORDAZ y ESBERT, 1985).

## 6. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto 485/88), por la financiación de este trabajo.

Al arquitecto Jaime Fresquet, del Servei de Patrimoni de la Conselleria de Cultura de Lleida, por su ayuda y comentarios.

## 7. BIBLIOGRAFIA

CHUNG, F. H. (1974a): *Quantitative interpretation of X-Ray diffraction patterns of mixtures: I. Matrix-flushing method for quantitative multicomponent analysis*. J. Appl. Cryst., 7, pp. 519-525.

CHUNG, F. H. (1974b): *Quantitative interpretation of X-Ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-Ray diffraction analysis of mixtures*. J. Appl. Cryst., 7, pp. 526-531.

ESBERT, R. M.; MARCOS, R. M.; ORDAZ, J.; MONTOTO, M.; SUAREZ DEL RIO, L. M.; RUIZ DE ARGANDOÑA, V. G.; CALLEJA, L.; ALONSO, F. J., y RODRIGUEZ REY, A. (1989): *Petrografía, propiedades físicas y durabilidad de algunas rocas utilizadas en el patrimonio monumental de Catalunya, España*. Materiales de Construcción, 32 (214), pp. 37-47.

I.G.M.E. (1971): *Mapa Geológico de España*. Esc. 1:200.000. Lérida, 31 pp.

I.G.M.E. (1980): *Mapa Geológico de España*. Esc. 1:200.000. Hospitalet, 38 pp.

LARA PEINADO, F. (1977): *Lérida. La Seo Antigua*. Dilagro, S. A. Ediciones. Lérida.

ORDAZ, J., y ESBERT, R. M. (1985): *Porosity and capillarity in some sandstone and dolomite monumental stones*. Vth. Int. Cong. on Deterioration and Conservation of Stone. Lausana, Presses Polytechniques Romandes, vol. 1, pp. 93-102.

Original recibido: Diciembre de 1992.

Original aceptado: Enero de 1993.

# El metamorfismo hercínico de bajo a muy bajo grado en la Zona Cantábrica (Provincias de León, Asturias, Cantabria).

Por A. APARICIO (\*), J. M. BRELL (\*\*) y R. GARCIA (\*)

## RESUMEN

Se analizan los procesos metamórficos hercínicos y su transición a diagénesis en las series paleozoicas que constituyen la Zona Cantábrica. En función de las paragénesis encontradas y determinaciones de diferentes parámetros metamórficos se hace una evaluación de la intensidad del metamorfismo y su distribución en la secuencia paleozoica. Las características de este metamorfismo se comparan con las de otras áreas del Hercínico Ibérico.

*Palabras clave:* Metamorfismo, Bajo grado, Hercínico, Zona Cantábrica.

## ABSTRACT

The Hercynian metamorphic processes and its transition to diagenesis are described in the paleozoic series of the Zona Cantábrica structure. One evaluation of the intensity and features of this metamorphism is done in relation with the paragénesis and different metamorphic parameters. Finally, this metamorphism is compared against other low grade hercynian metamorphic areas in the Iberian Massif.

*Key words:* Metamorphism, Low grade, Hercynic, Zona cantábrica.

## INTRODUCCION

El área hercínica ibérica de la zona cantábrica (Z.C.) corresponde a una unidad que por sus características estructurales y estratigráficas ha sido ampliamente estudiada por numerosos autores. Una síntesis, relativamente reciente, de los aspectos estructurales y estratigráficos, puede encontrarse en JULIVERT (1983 a y b), RODRIGUEZ-FERNANDEZ (1983), PEREZ ESTAUN et al. (1988, 1991) y PEREZ ESTAUN y BASTIDA (1990) en cuanto a procesos deformativos y en PEREZ ESTAUN (1973), ZAMARREÑO (1983), JULIVERT y TRUYOLS (1983), TRUYOLS y JULIVERT (1983), JULIVERT et al. (1983), TRUYOLS (1983), SANCHEZ DE LA TORRE et al. (1983) para las descripciones estratigráficas del Paleozoico. En este sentido la Z.C. se esquematiza en un núcleo de edad carbonífera, rodeado por una secuencia

de materiales paleozoicos que alcanzan el Cámbrico y más problemáticamente a niveles que se consideran del Precámbrico. El conjunto de estos materiales se encuentra a su vez delimitado en zonas producidas por mantos de corrimiento y fuerte fracturación, que condicionan ampliamente la disposición de los materiales carboníferos (JULIVERT, 1983 a).

Sin embargo el aspecto temático que correspondería a la evaluación y determinación de los procesos metamórficos que afectan a la Z.C. en toda su extensión no ha sido tratado hasta la actualidad. Este hecho ha repercutido negativamente al querer relacionar el metamorfismo de este área con los procesos metamórficos que afectaron al resto del Macizo Hercínico Ibérico. Las propias características litológicas de los materiales paleozoicos que constituyen este sector, ha influido en la idea desarrollada por algunos autores, como PEREZ ESTAUN (1978), JULIVERT (1983 c), MARTINEZ y GIL IBARGUCHI (1983) de que, al menos para el Paleozoico Superior, se trata de áreas no metamórficas.

(\*) Dpto. de Geología, Museo Nacional de Ciencias Naturales, CSIC. C/. José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

(\*\*) Dpto. de Estratigrafía, Instituto Geología Económica, CSIC. Univ. Complutense. 28040 Madrid.

A pesar de estas observaciones en contra de la existencia de metamorfismo, un primer trabajo en la cuenca carbonífera de Ciñera-Matallana realizado por GALAN et al. (1978) pone de manifiesto la existencia de un metamorfismo de bajo grado que afectaba al Carbonífero Superior. Trabajos posteriores y en áreas reducidas BRIME y PEREZ ESTAUN (1980); BRIME (1981,1985); GALAN et al. (1985); ALLER y BRIME (1985); GUTIERREZ y TAMARGO (1987) y ALLER et al. (1987) corroboran la existencia de estos procesos metamórficos de baja intensidad que afectan a todo el Paleozoico, incluyendo el Carbonífero, con niveles de bajo y muy bajo grado metamórfico, que le hace perfectamente correlacionable con el que se encuentra en unidades estratigráficas similares de otras áreas hercínicas.

#### MÉTODOS

La principal dificultad para el análisis metamórfico global de los materiales paleozoicos que constituyen la Z.C. reside en la escasa representatividad que presentan muchos de los niveles estratigráficos, y en segundo término, a la escasez de materiales pelíticos. Así el Ordovícico y Silúrico presentan litologías ricas en cuarzo que hacen escasamente muestreable estos períodos. En el Carbonífero, la extensión de las rocas carbonatadas hace igualmente difícil, en algunos sectores, el muestreo de rocas pelíticas; por el contrario, en el Precámbrico, Cámbrico y Devónico abundan este tipo de rocas.

En la selección de las muestras estudiadas se tuvieron en cuenta el tamaño de grano y que el contenido de carbonatos fuese inferior al 15 por 100 y de cuarzo el 25 por 100. En casos aislados se superaron estos valores en función de su representatividad.

De esta forma un total de 211 muestras se tomaron en los diferentes niveles estratigráficos, estudiándose por métodos ópticos y difracción de rayos X. Los parámetros metamórficos y paragénesis fueron exaludados a partir de difractogramas sobre polvo total y de agregados orientados, solvatación con etilenglicol y calentamiento de 550° según GALAN et al. (1978) y APARICIO et al. (1988).

El equipo utilizado corresponde a un difractóme-

tro Philips PW-1710 equipado con una fuente de radiación  $\text{CuK}\alpha$  a 40 kw y 30 mA, monocromador de grafito y ventana de divergencia de 1°. Los agregados orientados fueron corridos de 2° a 20° con una velocidad de goniómetro de 2°/min. una CT 2, velocidad de papel 10 mm  $\times$  2° y un tamaño de paso 0,05°. Se tuvieron en cuenta las recomendaciones expresadas en KISH (1991) y las delimitaciones establecidas por DUNOYER DE SEGONZAÇ (1969), con el fin de poder comparar los resultados.

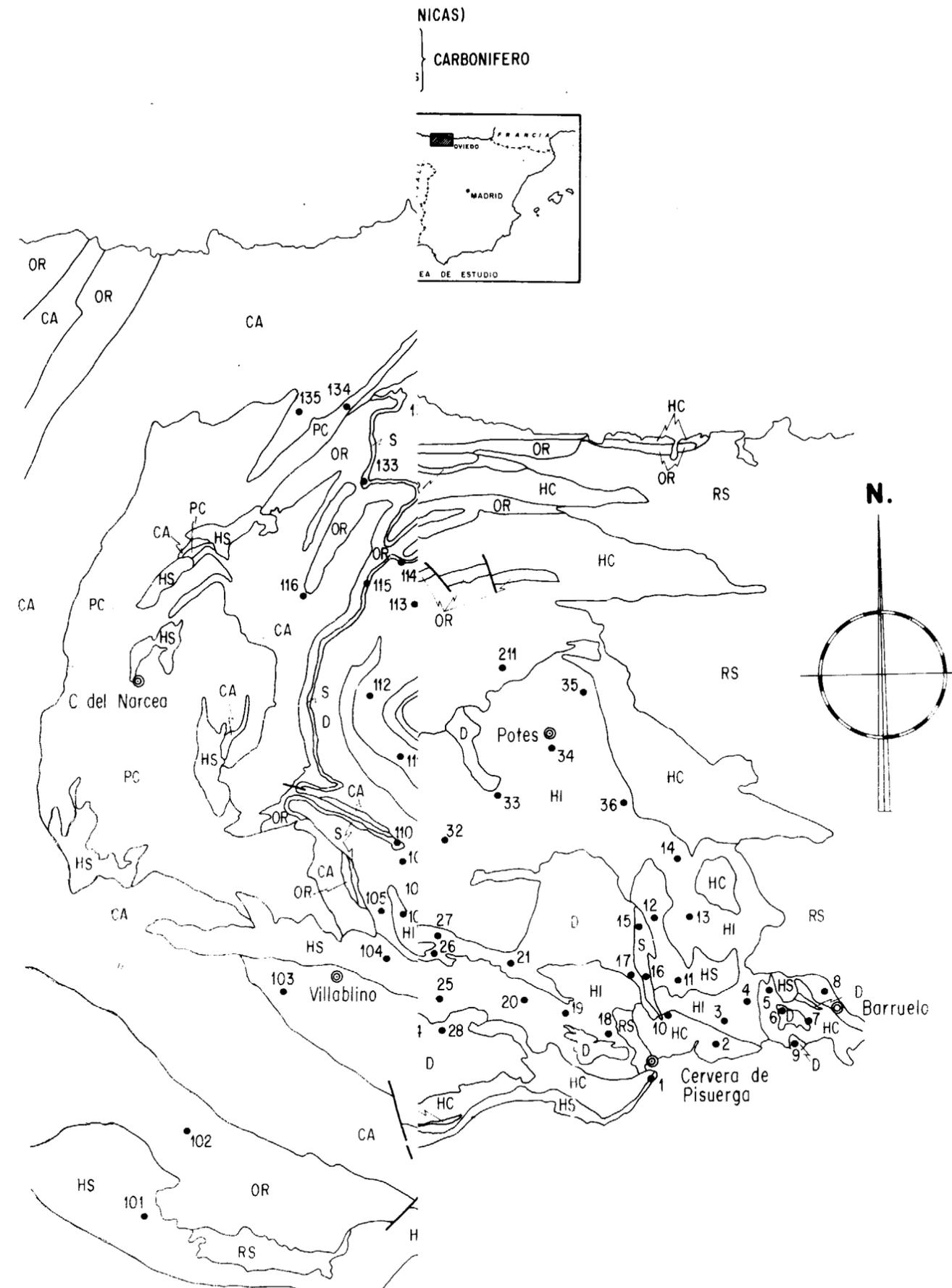
#### SECUENCIAS METAMORFICAS

En la figura 1 se ha representado la situación de las muestras sobre un esquema estratigráfico obtenido a partir de la cartografía geológica existente, tomando como base la publicada por el I.T.G.E. a escalas 1/200.000 y 1/50.000 (Serie Magna) en el área estudiada y alrededores.

En la tabla 1 se han representado las paragénesis de las rocas estudiadas, así como los principales parámetros con significado metamórfico, obtenidos a partir de difractogramas, y en función de su posición estratigráfica. Además se indican los índices de cristalinidad (I.C.) de la illita definido por KUBLER (1968) y WEAVER (1960), los valores de la reflexión (060), la relación 004/002 de las micas, politipo e índice de paragonitización.

En la figura 2 se han representado los I.C. de KUBLER según el diagrama de ESQUEVIN (1969) para cada sistema estratigráfico. La separación de las zonas metamórficas (epizona-anquizona) de las no metamórficas (diagénesis) y su distribución en los diferentes sistemas, indica que numerosas muestras se sitúan en los niveles considerados metamórficos, siendo este hecho más significativo para el Precámbrico, Cámbrico y Carbonífero, mientras que en el Ordovícico, Silúrico y Devónico se observa una mayor frecuencia en los niveles de carácter no metamórficos.

La dispersión entre muestras metamórficas y no metamórficas, según el I.C., es evidente para todos los niveles estratigráficos considerados, lo que permite apreciar que la transición entre las zonas metamórficas no es fija para cada período. Una representación planar de la variación de la intensidad del metamorfismo en función del I.C.



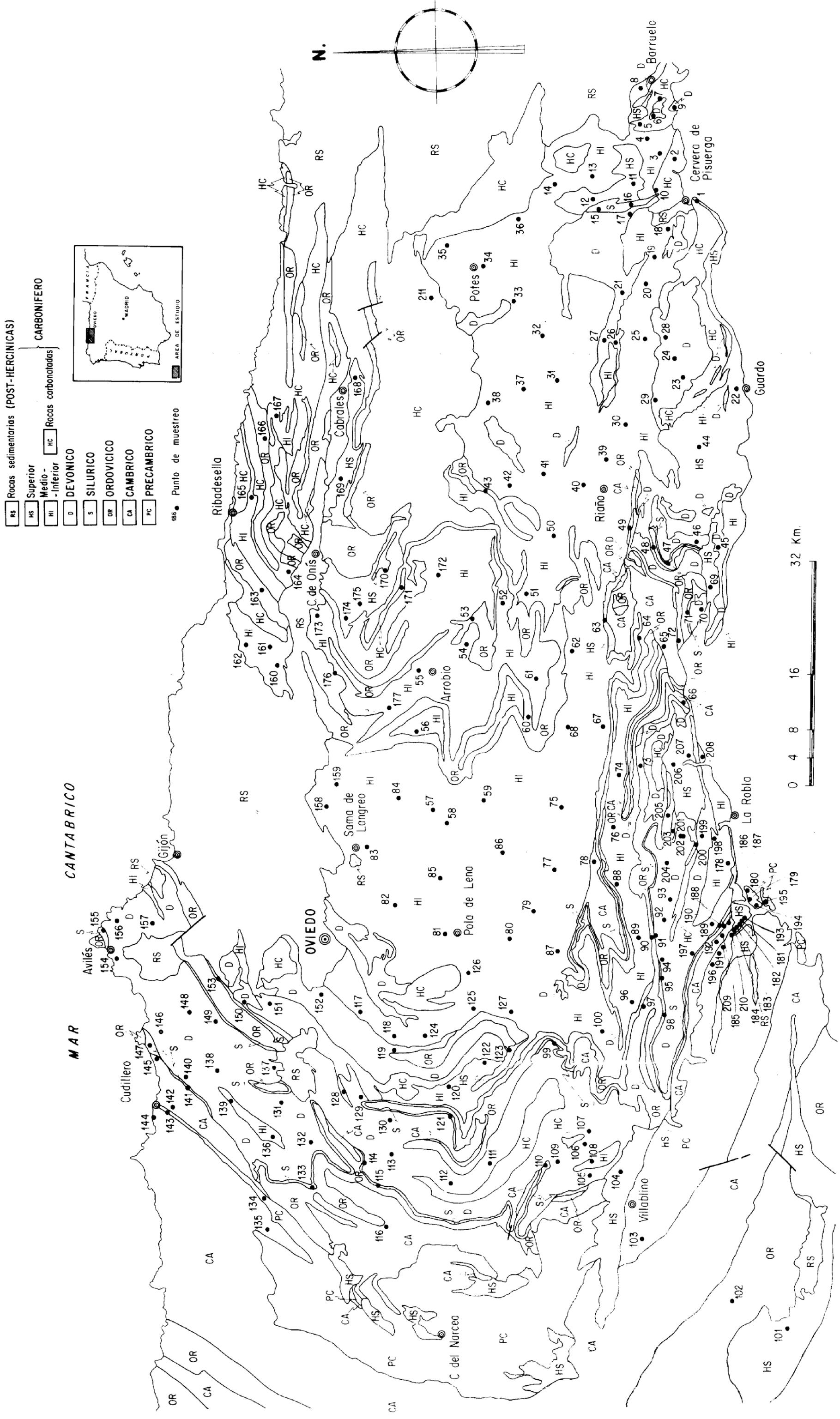


Figura 1.—Esquema geológico de la zona cantábrica (Z.C.) a partir de la cartografía a escala 1/200.000 y 1/50.000 (Serie Magna) publicada por el ITGE. Sobre el esquema se han localizado las muestras estudiadas

**TABLA 1**  
**Composición de las muestras analizadas y principales parámetros de interés metamórfico**

Muestra	Cuarzo	Filosil.	FELDESPAT.			Mica	Caolinit.	Clorit.	Esme.	Inter.	Otros	INDICES		060	0010	004 002	3,74 2,58	Politipo Moscovita	Indice Paragon.
			K	Na-Ca	Otros							Kubler	Weav.						
<b>P R E C A M B R I C O</b>																			
103	26	67	—	7	—	54	26	20	—	—	—	3	6	1,508	1,995	0,41	0,56	100 % 2MI	—
134	19	75	—	6	—	54	22	10	—	I/C 14	—	3	10	1,509	1,995	0,34	0,47	100 % 2MI	—
143	22	72	—	6	—	56	18	26	—	—	—	2,5	4,6	1,511	1,998	0,40	0,44	100 % 2MI	—
179	+	+	—	+	Cloritoi.	75	16	9	—	—	—	4,5	2,5	1,504	1,995	0,24	0,38	100 % 2MI	—
180	29	65	—	6	—	85	10	5	—	—	—	3,5	2,8	1,506	1,994	0,25	0,35	100 % 2MI	—
185	25	75	—	—	—	68	20	12	—	—	—	6	4	1,504	1,996	0,26	0,32	90 % 2MI	—
191	20	80	—	—	—	72	18	10	—	—	—	4	4	1,507	1,993	0,21	0,33	100 % 2MI	—
194	22	72	—	6	—	50	28	22	—	—	—	4	6	1,510	1,994	0,40	0,28	72 % 2MI	—
195	28	72	—	indic.	—	50	14	20	—	C/V 16	—	2,5	5,2	1,503	1,993	0,35	0,40	100 % 2MI	—
196	20	73	—	7	—	78	12	—	—	C/V 10	—	5	3,8	1,502	1,995	0,40	0,40	100 % 2MI	—
209	25	75	—	—	—	89	6	5	—	—	—	4,5	2,6	1,507	1,993	0,28	0,45	100 % 2MI	—
210	28	72	—	—	—	93	indic.	—	—	C/V 7	—	5	2,5	1,506	1,993	0,28	0,25	60 % 2MI	—
<b>C A M B R I C O</b>																			
49	11	89	indic.	—	—	100	—	indic.	—	—	—	8	1,6	1,502	1,991	0,25	0,26	64 % 2MI	0,18
64	10	52	—	—	Calcita 38	—	—	—	—	—	—	ID	ID	1,506	1,993	—	0,32	90 % 2MI	—
65	22	78	indic.	—	—	100	—	—	—	—	—	6	1,7	1,506	1,993	0,28	0,26	64 % 2MI	—
66	20	76	indic.	4	—	81	8	6	—	C/E 5	—	10	1,2	1,503	1,995	0,33	0,38	100 % 2MI	—
78	25	75	—	—	—	100	—	—	—	—	—	6	2,2	1,502	1,995	0,34	0,29	76 % 2MI	—
90	18	82	indic.	—	—	78	12	—	—	C/E 10	—	10	1,3	1,503	1,995	0,44	0,30	80 % 2MI	—
97	10	90	—	—	—	100	—	—	—	—	—	5	2,1	1,501	1,993	0,27	0,32	90 % 2MI	—
116	18	82	—	—	—	85	5	—	—	C/V 10	—	3,5	4	1,504	1,992	0,30	0,22	48 % 2MI	—
135	22	71	—	7	—	68	18	14	—	—	—	2,5	14	1,504	1,996	0,28	0,43	100 % 2MI	—
142	26	74	—	—	—	100	—	—	—	—	—	2,5	6,8	1,514	1,994	0,20	0,42	100 % 2MI	—
144	19	74	—	7	—	60	16	24	—	—	—	2	12	1,513	1,997	0,29	0,39	100 % 2MI	—
145	28	72	—	—	—	58	19	23	—	—	—	2,5	8,4	1,508	1,995	0,39	0,42	100 % 2MI	—
186	33	62	5	—	—	75	15	10	—	—	—	7	2,7	1,506	1,987	0,24	0,38	100 % 2MI	0,45
187	24	76	—	—	—	96	—	—	—	C/E 5	—	6,5	2	1,499	1,991	0,25	0,28	72 % 2MI	0,18
192	22	78	—	—	—	77	15	8	—	—	—	4,5	2,9	1,509	1,992	0,25	0,29	76 % 2MI	0,11
<b>O R D O V I C I C O</b>																			
43	9	91	—	—	—	78	6	—	—	I/C 16	—	6	2,3	1,505	2,000	0,40	0,37	100 % 2MI	—
48	16	79	5	indic.	—	60	40	—	—	—	—	10	1,4	1,494	1,995	0,38	0,42	100 % 2MI	—
53	15	85	—	—	—	100	—	—	—	—	—	4,5	2,9	1,503	2,001	0,32	0,30	80 % 2MI	—
60	12	78	—	—	Calcita 12	78	10	12	—	—	—	6	2,1	1,507	1,995	0,28	0,32	90 % 2MI	—
72	4	96	—	—	—	34	51	15	—	—	—	10	1,2	—	—	0,42	—	—	—
73	5	95	—	—	—	36	54	10	—	—	—	ID	ID	—	—	ID	—	—	—
102	11	85	—	4	—	56	24	20	—	—	—	2,5	7,7	1,499	1,999	0,30	0,54	100 % 2MI	—
163	28	72	—	—	—	92	8	—	—	—	—	7	2	1,506	1,993	0,28	0,28	72 % 2MI	—
166	24	76	—	—	—	89	11	indic.	—	—	—	7	1,8	1,504	1,991	0,33	0,34	100 % 2MI	0,18
188	26	74	—	—	—	100	—	—	—	C/E indic.	—	6	2,1	1,501	1,994	0,26	0,26	64 % 2MI	—
203	36	53	11	—	—	89	11	indic.	—	—	—	8	1,5	1,501	1,992	0,23	0,32	90 % 2MI	0,11
<b>S I L U R I C O</b>																			
15	9	91	—	indic.	—	80	5	15	—	—	—	5	2,6	1,504	2,000	0,4	0,25	60 % 2MI	—
16	13	87	—	—	—	78	5	17	—	—	—	4	3,8	1,498	2,000	0,3	0,40	100 % 2MI	—
47	6	82	6	—	—	90	5	—	—	I/E 5	—	7	1,8	1,501	1,993	0,38	0,33	100 % 2MI	—
71	10	85	5	—	—	81	19	—	—	—	—	11	1,4	1,503	1,995	0,37	0,25	60 % 2MI	—
91	16	84	—	—	—	68	32	indic.	—	—	—	6	1,8	1,504	1,995	0,34	0,22	48 % 2MI	—
95	5	95	—	—	—	82	12	—	6	—	—	10	1,7	1,506	1,995	0,30	0,33	100 % 2MI	—
98	10	90	—	—	—	79	21	—	—	—	—	7	1,4	1,502	2,000	0,37	0,31	90 % 2MI	—
99	4	96	—	—	—	82	18	indic.	—	—	—	12	1,3	1,504	1,993	0,40	0,35	100 % 2MI	—
110	6	94	—	—	—	76	24	indic.	—	—	—	8	1,6	1,499	1,995	0,42	0,28	72 % 2MI	—

Muestra	FELDESPAT.						INDICES						004	3,74	Politipo	Indice			
	Cuarzo	Filosil.	K	Na-Ca	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esme.	Inter.	Otros	Kubler					Weav.	060	0010
115	22	78	—	—	—	75	14	—	—	—	Pirofil 11	5	2,2	1,501	1,995	0,34	0,31	90 % 2MI	—
121	10	90	—	—	—	76	18	—	—	C/E 6	—	8	1,5	1,500	1,992	0,44	0,26	64 % 2MI	—
133	8	92	—	—	—	67	27	indic.	—	—	Pirofil 6	7	2,8	1,500	2,000	0,40	0,23	52 % 2MI	—
141	20	80	—	—	—	78	9	—	—	C/V 12	—	2,5	9	1,506	1,997	0,36	0,48	100 % 2MI	—
147	20	80	—	—	—	76	10	—	—	C/V 14	—	4,5	1,6	1,505	1,991	0,32	0,35	100 % 2MI	—
153	7	93	—	—	—	100	—	—	—	—	—	10	1,3	1,504	1,997	0,40	0,25	60 % 2MI	—
155	36	64	—	—	—	89	5	—	—	—	Verm. 6	7	1,8	1,501	1,987	0,34	0,29	76 % 2MI	0,45
190	15	85	—	—	—	75	25	—	—	—	Pirofil indic.	9	1,8	1,500	1,991	0,38	0,35	100 % 2MI	0,18
<b>DEVONICO</b>																			
6	14	74	—	—	—	Calcita 12	93	7	—	—	—	15	1,2	1,499	1,995	0,52	0,45	100 % 2MI	—
9	8	92	—	—	—	88	12	indic.	—	I/C indic.	—	13	1,5	1,501	1,991	0,52	0,53	100 % 2MI	0,18
17	8	92	—	—	—	78	—	22	—	—	—	6	2	1,495	1,991	0,35	0,26	64 % 2MI	0,18
21	20	80	—	—	—	56	16	28	—	—	—	3	6,1	1,517	2,000	0,37	0,39	100 % 2MI	—
23	6	94	—	—	—	25	8	—	—	—	Pirofil 67	5	2,7	1,493	—	0,26	—	—	—
24	+	+	+	+	+	89	6	5	—	—	—	3,5	5	—	—	0,32	—	—	—
26	6	94	—	—	—	72	16	12	—	—	—	3	3,7	1,523	2,000	0,42	0,46	100 % 2MI	—
27	7	93	indic.	—	—	80	14	6	—	—	—	2	4,1	1,525	2,000	0,43	0,43	100 % 2MI	—
28	+	+	+	+	+	82	8	10	—	—	—	3,5	4,9	—	—	0,32	—	—	—
29	19	76	—	5	—	70	17	13	—	—	—	3,5	4,3	1,500	1,999	0,26	0,45	100 % 2MI	—
45	15	85	—	—	—	62	33	5	—	—	—	12	1,2	1,499	1,995	0,40	0,25	60 % 2MI	—
46	7	81	—	—	—	Calcita 12	72	14	14	—	—	10	1,1	1,507	1,988	0,58	0,28	72 % 2MI	—
70	8	92	—	—	—	94	6	—	—	—	—	12	1,2	1,501	—	0,31	0,20	40 % 2MI	—
92	6	94	—	—	—	44	30	26	—	—	—	9	1,2	1,506	—	0,41	—	—	—
93	8	81	—	—	—	Calcita 11	54	32	14	—	—	9	1,5	1,507	—	0,32	—	—	—
94	6	94	—	—	—	52	34	indic.	—	C/E 14	—	8	1,3	—	—	0,26	—	—	—
105	15	85	—	—	—	100	—	—	—	indic.	—	10	1,2	1,500	1,993	0,30	0,17	30 % 2MI	—
106	13	88	—	—	—	Calcita 9	74	16	10	—	—	9	1,4	1,500	1,991	0,40	0,37	100 % 2MI	0,18
107	14	86	—	—	—	84	16	—	—	—	—	9	1,5	1,498	1,991	0,34	0,33	100 % 2MI	0,18
109	8	92	—	—	—	66	25	9	—	—	—	9	1,3	1,505	—	0,34	—	—	—
111	4	96	—	—	—	66	21	—	—	C/V 13	—	12	1,2	1,502	1,994	0,40	0,31	90 % 2MI	—
112	4	96	—	—	—	65	19	—	—	C/V 16	—	13	1,2	—	—	0,40	—	—	—
133	8	92	—	—	—	82	18	—	—	—	—	14	1,1	1,501	1,991	0,40	0,29	76 % 2MI	0,18
114	15	76	9	—	—	100	—	—	—	—	—	9	1,4	1,503	1,937	0,28	0,30	80 % 2MI	—
119	6	94	—	—	—	79	12	—	—	C/V 9	—	12	1,1	1,504	1,995	0,45	0,28	72 % 2MI	—
129	9	91	—	—	—	70	30	—	—	—	—	10	1,5	1,500	1,995	0,37	0,26	64 % 2MI	—
130	8	92	—	—	—	85	7	—	—	I/E 8	—	14	1,2	1,503	1,994	0,42	0,22	48 % 2MI	—
131	12	88	—	—	—	84	16	—	—	—	—	9	1,4	1,501	1,993	0,42	0,30	80 % 2MI	—
132	8	92	—	—	—	100	indic.	—	—	—	—	7,5	1,9	1,501	1,997	0,24	0,36	100 % 2MI	—
137	5	95	—	—	—	65	35	—	—	C/E indic.	—	ID	ID	1,503	1,992	—	0,20	40 % 2MI	0,11
138	24	76	—	—	—	87	13	—	—	—	—	10	1,7	1,501	1,989	0,30	0,32	90 % 2MI	0,32
140	10	90	—	—	—	100	indic.	—	—	—	—	3	4,8	1,510	1,994	0,26	0,38	100 % 2MI	—
146	9	91	—	—	—	92	8	indic.	—	—	—	10	1,5	1,502	1,991	0,25	—	—	0,18
148	18	82	—	—	—	83	5	—	—	C/V 12	—	11	1,4	1,497	1,987	0,32	0,34	100 % 2MI	—
149	5	95	—	—	—	92	8	—	—	—	—	9	1,8	1,503	1,995	0,26	0,26	64 % 2MI	—
150	6	94	—	—	—	80	12	—	—	C/V 8	—	12	1,6	1,507	1,991	0,31	0,30	90 % 2MI	0,18
152	9	91	—	—	—	77	14	9	—	—	—	12	1,6	1,505	1,987	0,48	0,24	56 % 2MI	—
154	12	88	—	—	—	86	8	6	—	—	—	5	3,4	1,503	1,991	0,30	0,35	100 % 2MI	0,18
156	13	87	—	—	—	78	14	—	—	C/E 8	—	7	1,5	1,500	1,990	0,42	0,31	90 % 2MI	0,25
157	10	90	—	—	—	88	12	—	—	indic.	—	10	1,2	1,497	1,991	0,30	0,35	100 % 2MI	0,18
189	18	82	—	—	—	71	21	indic.	—	—	Pirofil 8	7	2	1,499	1,995	0,27	0,30	80 % 2MI	—
197	2	74	—	—	—	80	12	—	—	—	—	9	1,2	1,498	1,990	0,27	0,29	76 % 2MI	0,25

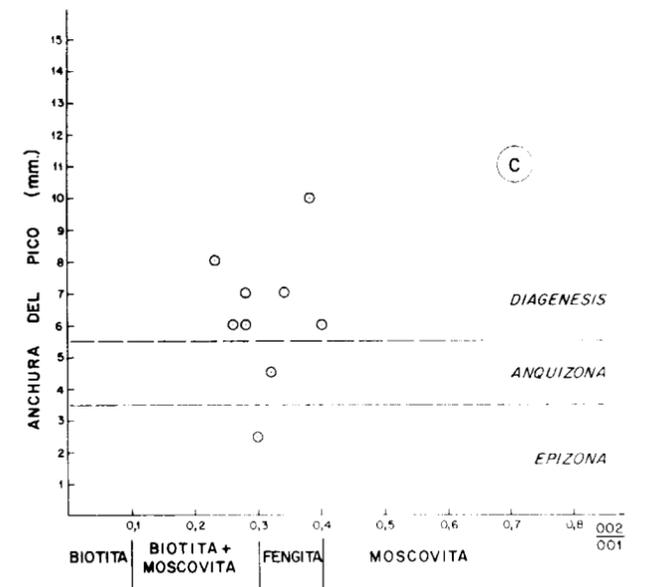
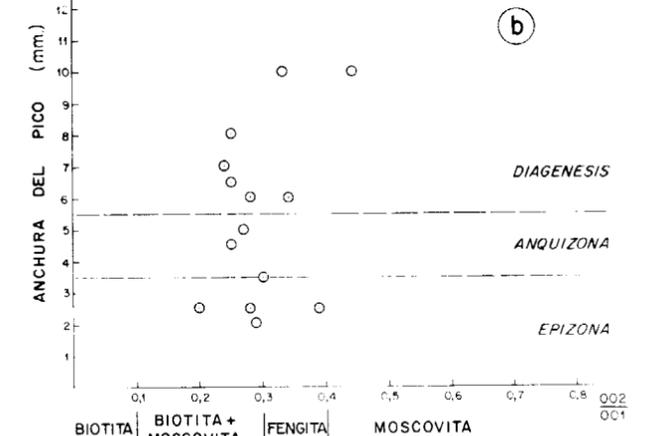
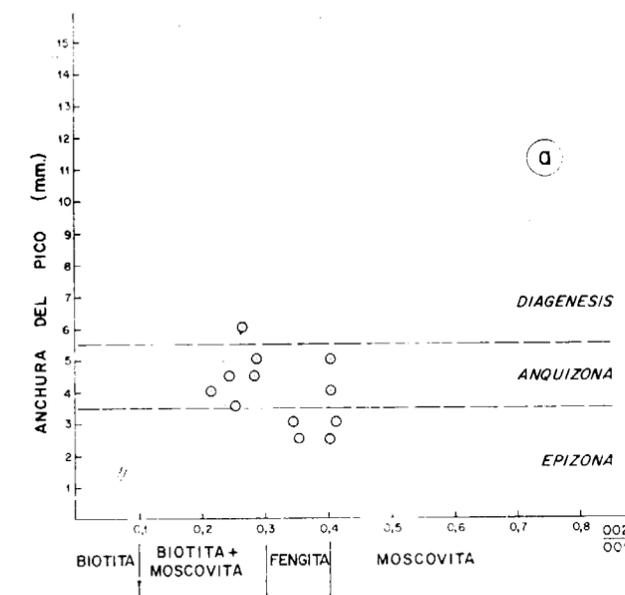
Muestra	FELDESPAT.						INDICES						004	3,74	Politipo	Indice				
	Cuarzo	Filosil.	K	Na-Ca	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esme.	Inter.	Otros	Kubler					Weav.	060	0010	002
199	27	73	—	—	—	76	17	—	—	C/V 7	—	6	2,1	1,506	1,995	0,38	0,32	90 % 2MI	—	
201	37	55	—	8	—	20	78	12	—	—	ID	ID	—	—	—	—	—	—	—	
202	16	84	—	—	—	—	68	—	—	I/E 32	—	ID	ID	—	—	—	—	—	—	
204	9	91	—	—	—	12	82	6	—	—	ID	ID	—	—	—	—	—	—	—	
205	2	92	—	—	—	14	74	—	—	C/V 12	—	ID	ID	—	—	—	—	—	—	
<b>CARBONIFERO INFERIOR-MEDIO</b>																				
2	14	81	—	5	—	75	17	8	—	—	—	6	2	1,503	1,998	0,45	0,45	100 % 2MI	—	
3	14	82	—	4	—	66	15	19	—	—	—	4,5	3,1	1,500	1,991	0,42	0,42	100 % 2MI	0,18	
4	10	85	—	5	—	70	16	7	—	I/C 7	—	5	2,1	1,503	1,993	0,41	0,45	100 % 2MI	—	
5	8	92	—	—	—	92	8	—	—	—	—	15	1,2	1,502	1,995	0,50	0,50	100 % 2MI	—	
7	13	69	—	5	—	Calcita 13	87	6	7	indic.	—	15	1,1	1,499	1,991	0,45	0,48	100 % 2MI	0,18	
10	10	90	—	indic.	—	—	83	17	—	—	—	6	1,5	1,503	1,995	0,41	0,40	100 % 2MI	—	
13	14	86	indic.	indic.	—	—	77	5	18	—	—	7	1,8	1,501	1,994	0,4	0,52	100 % 2MI	—	
14	16	84	—	—	—	74	14	12	—	—	—	7	1,7	1,499	1,993	0,35	0,45	100 % 2MI	—	
18	12	84	4	—	—	66	25	9	—	—	—	4,5	3	1,499	1,995	0,35	0,45	100 % 2MI	—	
19	13	82	5	—	—	74	18	8	—	—	—	3,5	4,7	1,504	1,992	0,42	0,33	100 % 2MI	0,11	
20	14	81	5	—	—	80	12	8	—	—	—	5,5	2,5	1,496	2,001	0,36	0,36	100 % 2MI	—	
25	16	84	indic.	—	—	73	12	15	—	—	—	4,5	2,8	1,498	1,997	0,45	0,33	100 % 2MI	—	
30	12	88	—	—	—	74	16	16	—	—	—	3,5	3,8	1,500	2,000	0,35	0,30	80 % 2MI	—	
31	19	81	indic.	—	—	72	19	9	—	—	—	2,5	4,1	1,499	1,999	0,35	0,31	90 % 2MI	—	
32	16	84	—	—	—	89	5	6	—	—	—	6	2,1	1,500	1,997	0,30	0,38	100 % 2MI	—	
33	8	92	indic.	—	—	81	10	9	—	—	—	4,5	5,5	1,498	2,000	0,27	0,38	100 % 2MI	—	
34	6	94	indic.	—	—	68	22	10	—	—	—	5,5	2,2	1,498	1,995	0,37	0,36	100 % 2MI	—	
35	5	90	5	—	—	76	—	—	—	—	—	Pirofil 24	5	2,4	1,496	2,000	0,42	0,28	72 % 2MI	—
36	4	96	—	—	—	52	14	14	—	—	—	Pirofil 20	8	1,4	1,495	1,991	0,42	0,45	100 % 2MI	—
37	22	78	—	—	—	72	13	15	—	—	—	3	4,2	1,499	2,000	0,35	0,36	100 % 2MI	—	
38	12	88	—	—	—	73	18	9	—	—	—	5	2,5	1,500	1,995	0,25	0,42	100 % 2MI	—	
39																				

Muestra	FELDESPAT.					INDICES										004	3,74	Politipo	Indice	
	Cuarzo	Filosil.	K	Na-Ca	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esme.	Inter.	Otros	Kubler	Weav.	060	0010					002
<b>CARBONIFERO INFERIOR-MEDIO (cont.)</b>																				
96	15	67	—	—	Calcita 18	78	10	7	—	C/E	5	—	8	1,3	—	—	0,26	—	—	
100	12	79	—	—	Calcita 9	79	15	6	—	—	—	12	1,3	1,502	1,995	0,40	0,30	80 % 2MI	—	
108	12	88	—	—	—	72	18	10	—	—	—	8	1,5	1,497	2,000	0,35	0,35	100 % 2MI	—	
117	15	85	—	—	—	85	10	—	—	C/V	5	—	14	1,5	1,501	1,991	0,32	0,32	90 % 2MI	—
118	17	83	—	—	—	80	8	—	—	C/V	12	—	10	1,6	1,502	1,989	0,42	0,25	60 % 2MI	0,32
120	14	86	—	—	—	70	30	—	—	ID	ID	—	ID	1,505	—	—	—	—	—	—
122	16	84	—	—	—	73	17	—	—	C/E	10	—	11	1,2	1,501	1,991	0,40	0,31	90 % 2MI	0,18
124	9	91	—	—	—	80	12	indic.	—	C/E	8	—	10	1,8	1,500	1,987	0,38	0,27	68 % 2MI	0,45
125	7	93	—	—	—	82	8	—	—	C/E	10	—	10	1,7	1,499	1,993	0,38	0,32	90 % 2MI	—
126	21	79	—	—	—	68	18	14	—	—	—	—	5	2,1	1,504	1,993	0,45	0,35	100 % 2MI	—
127	17	83	—	—	—	76	8	indic.	—	C/V	16	—	14	1,2	1,500	1,994	0,38	0,38	100 % 2MI	—
128	15	85	—	—	—	80	5	—	—	C/V	15	—	9	1,6	1,501	1,991	0,38	0,37	100 % 2MI	0,18
136	18	82	—	indic.	—	72	20	—	—	C/E	8	—	11	1,2	1,504	1,993	0,36	0,33	100 % 2MI	—
139	14	86	—	—	—	85	8	—	—	Verm	17	—	11	1,4	1,501	1,992	0,36	0,36	100 % 2MI	0,11
151	15	85	—	—	—	74	8	—	—	E/V	18	—	18	2	1,503	1,987	0,37	0,24	56 % 2MI	—
158	24	76	—	—	—	73	10	12	—	C/V	5	—	4,5	2,4	1,502	1,996	0,35	0,34	100 % 2MI	—
159	25	75	—	—	—	14	15	11	—	—	—	—	6	2	1,502	1,993	0,35	0,36	100 % 2MI	—
160	32	68	—	—	—	83	12	5	—	—	—	—	8	1,5	1,505	1,992	0,40	0,29	76 % 2MI	0,11
161	21	79	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8	1,6	1,507	1,990	0,42	0,40	100 % 2MI	0,25
162	24	76	—	—	—	81	10	—	—	C/V	9	—	7	1,6	1,503	1,997	0,32	0,31	90 % 2MI	—
164	16	84	—	—	—	74	18	—	—	C/V	8	—	5	2	1,503	1,993	0,35	0,35	100 % 2MI	—
165	15	85	—	—	—	62	20	18	—	—	—	—	7	1,7	1,503	1,997	0,42	0,38	100 % 2MI	—
167	22	88	—	—	—	77	13	—	—	C/V	10	—	7	2	1,506	1,999	0,44	0,34	100 % 2MI	—
171	23	72	—	—	—	84	8	—	—	C/V	8	—	5	2,1	1,505	1,996	0,44	0,42	100 % 2MI	—
172	16	84	—	—	—	86	7	—	—	C/V	7	—	6	2	1,505	1,997	0,36	0,40	100 % 2MI	—
173	15	85	—	—	—	77	14	—	—	C/V	9	—	5,5	2,1	1,506	1,996	0,31	0,32	90 % 2MI	—
174	12	88	—	—	—	72	18	—	—	C/V	10	—	6	2,1	1,506	1,998	0,30	0,42	100 % 2MI	—
175	14	86	—	—	—	84	7	—	—	C/V	9	—	6	2	1,505	1,996	0,40	0,32	90 % 2MI	—
176	26	74	—	—	—	63	16	21	—	—	—	—	4	3,2	1,506	1,996	0,40	0,38	100 % 2MI	—
177	32	68	—	—	—	63	18	19	—	—	—	—	3,5	3	1,504	1,996	0,38	0,38	100 % 2MI	—
178	40	51	—	9	—	80	10	10	—	—	—	—	7	1,7	1,504	1,991	0,35	0,40	100 % 2MI	0,18
198	14	28	—	—	Siderita 58	85	8	7	—	—	—	—	9	1,2	—	—	0,32	—	—	—
208	22	74	—	4	—	70	15	—	—	C/V	15	—	7	3,1	1,506	1,995	0,31	0,40	100 % 2MI	—
211	18	74	—	—	Calcita 8	79	3	13	—	—	—	—	9	1,6	1,502	—	0,44	0,32	90 % 2MI	—
<b>CARBONIFERO SUPERIOR</b>																				
1	15	85	indic.	—	—	84	6	10	—	—	—	4,5	2,5	1,506	1,994	0,40	0,46	100 % 2MI	—	
8	10	90	—	—	—	84	5	6	indic.	—	Pirofil 5	8	1,6	1,506	1,996	0,46	0,52	100 % 2MI	—	
11	9	91	—	—	—	94	6	—	—	—	—	9	1,6	1,502	1,998	0,5	0,30	80 % 2MI	—	
12	12	88	indic.	—	—	70	11	5	—	—	Pirofil 14	4	2,9	1,499	1,991	0,4	0,36	100 % 2MI	—	
22	21	89	indic.	—	—	70	12	11	—	—	Pirofil 7	4	2,8	1,499	2,000	0,40	0,36	100 % 2MI	—	
44	21	79	—	—	—	66	20	14	—	—	—	6	3,3	1,499	1,995	0,32	0,48	100 % 2MI	—	
63	13	87	indic.	—	—	76	8	8	—	—	I/C	5	2,3	1,503	1,994	0,37	0,34	100 % 2MI	—	
69	19	81	indic.	indic.	—	66	24	10	—	—	—	4,5	2,4	1,504	1,996	0,34	0,25	60 % 2MI	—	
101	9	81	—	—	—	100	—	—	indic.	—	—	7	2,2	1,501	1,998	0,38	0,48	100 % 2MI	—	
104	10	90	—	indic.	—	78	14	8	—	—	—	4	4	1,501	1,994	0,32	0,28	72 % 2MI	—	

Muestra	FELDESPAT.					INDICES										004	3,74	Politipo	Indice	
	Cuarzo	Filosil.	K	Na-Ca	Otros	Mica	Caolinit.	Clorit.	Esme.	Inter.	Otros	Kubler	Weav.	060	0010					002
123	19	81	—	—	—	83	5	—	—	C/E	12	—	6	2	1,501	1,994	0,42	0,44	100 % 2MI	—
168	13	54	—	—	Calcita 33	92	8	—	—	—	—	—	6	2	1,505	1,997	0,38	0,38	100 % 2MI	—
169	26	62	—	—	Calcita 12	78	19	12	—	—	—	—	6	1,8	1,508	1,998	0,27	0,40	100 % 2MI	—
170	20	80	—	—	—	66	20	14	—	C/V	incid.	—	6	2,4	1,505	1,996	0,40	0,34	100 % 2MI	—
181	33	67	—	—	indic.	60	23	17	—	—	—	—	4	2,8	1,509	1,993	0,26	0,33	100 % 2MI	—
182	+	+	—	—	+	Cloritoi.	78	14	8	—	—	—	5	1,9	1,505	1,993	0,48	0,35	100 % 2MI	—
183	30	65	—	—	5	67	21	12	—	—	—	—	5	3,2	1,507	1,991	0,29	0,40	100 % 2MI	0,18
184	28	64	—	—	8	65	24	11	—	—	—	—	6	3,3	1,507	1,996	0,30	0,24	56 % 2MI	—
193	24	70	—	—	6	54	22	24	—	—	—	—	3	4,8	1,507	1,992	0,27	0,40	100 % 2MI	0,11
200	25	75	—	—	—	79	16	—	—	I/E	5	—	4	2,7	1,508	1,993	0,36	0,32	90 % 2MI	—
206	26	74	—	—	—	59	22	19	—	—	—	—	3,5	2,8	1,507	1,990	0,32	0,32	90 % 2MI	0,25
207	19	76	—	—	5	72	14	—	—	C/V	14	—	5	2,5	1,504	1,991	0,20	0,30	80 % 2MI	0,18

**Explicación:**

- Indic. = Indicios
- ND = No determinado
- ++ = No cuantificado
- Interest. = Interestratificados=/  
= Illita
- C = Clorita
- E = Esmeclita=Esmecl.
- V = Vermiculita=Verm.
- Caolinita = Caolinit.
- Pirofilita = Pirofil.
- Filosilicatos = Filosil.
- Cloritoide = Cloritoi.
- Clorita = Clorit.
- Dolomita = Dolomit.



se expresa en la figura 3. Para el Precámbrico se observa que la máxima intensidad metamórfica se sitúa en el sector oeste de la zona, con una tendencia (positiva) al aumento representada en el Precámbrico aflorante al oeste de La Robla.

El Cámbrico refleja la misma tendencia de aumento del metamorfismo hacia el oeste y NO, con mínimos concentrados en el sector sur. Aun-

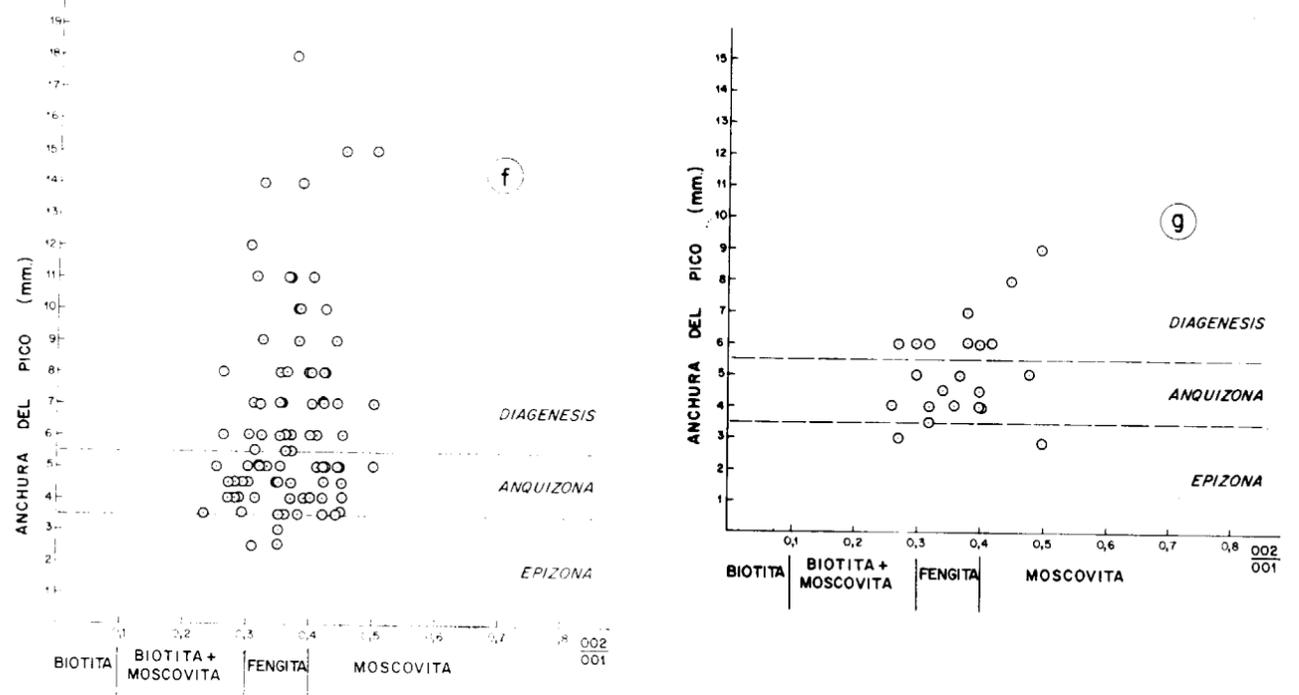
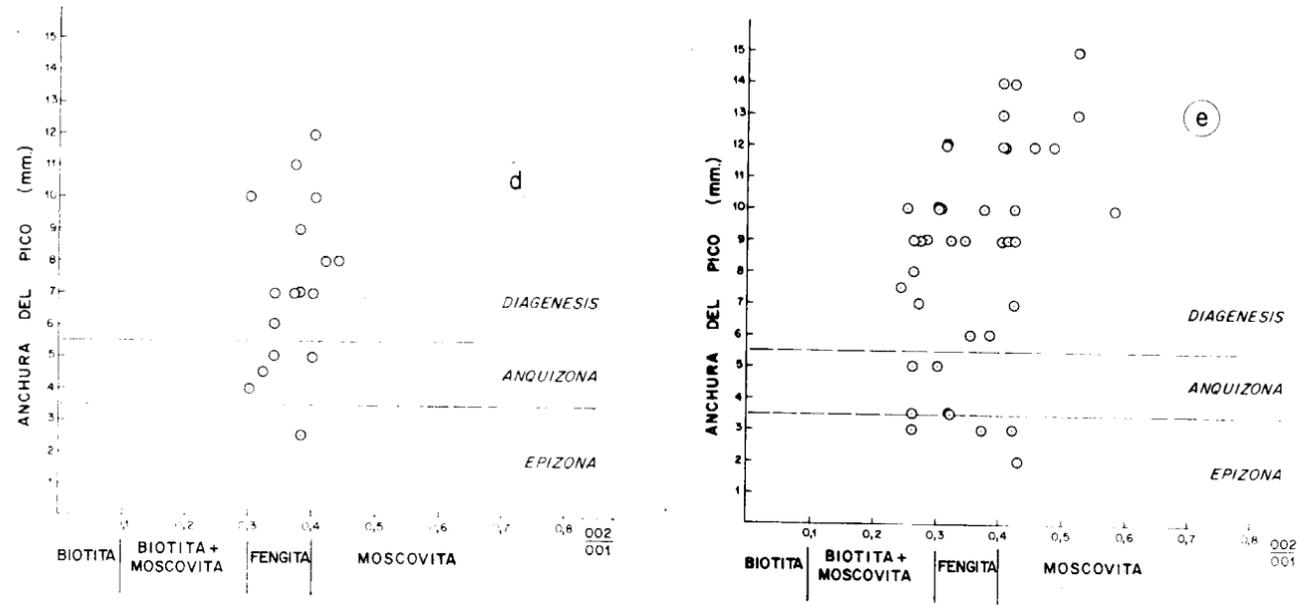
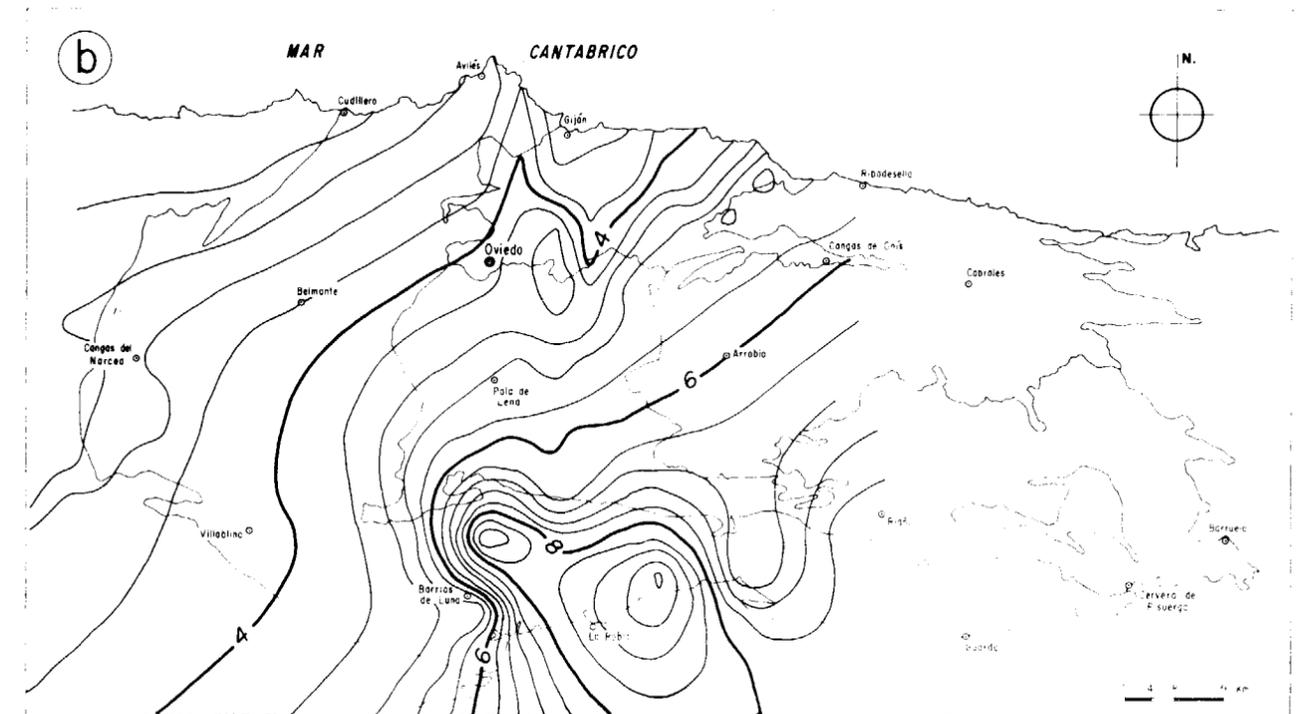
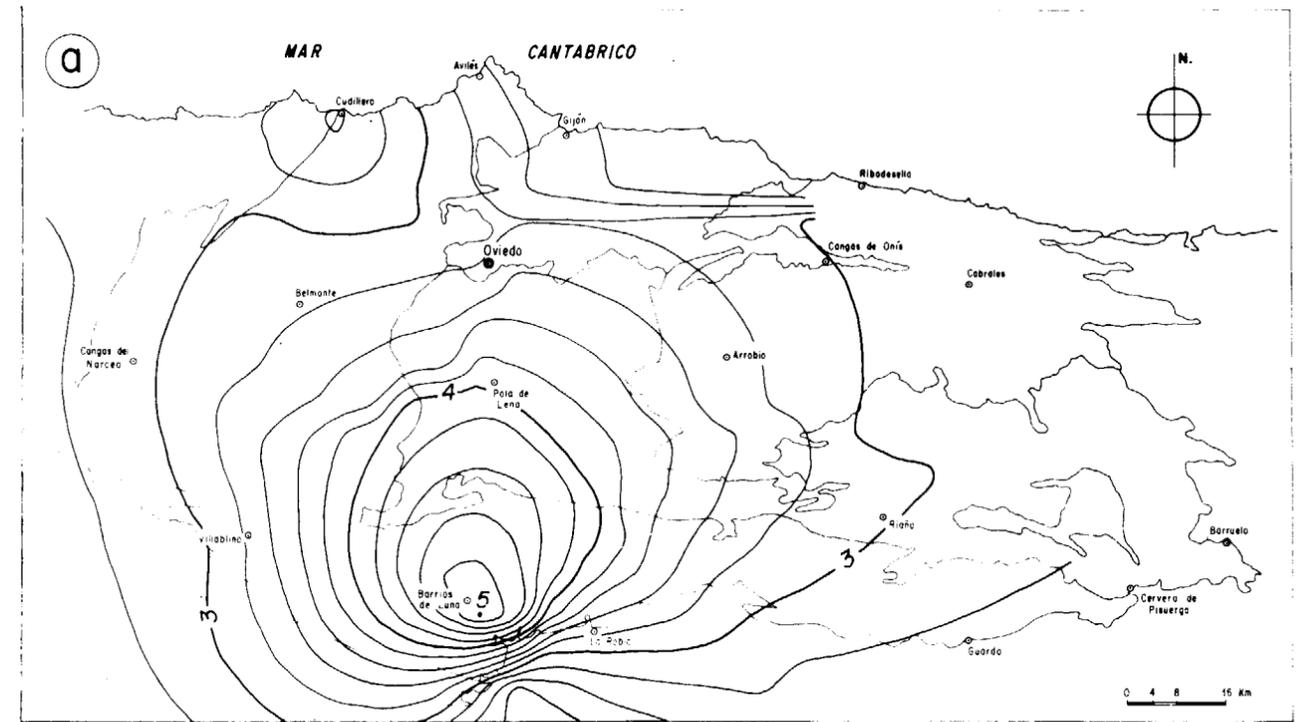
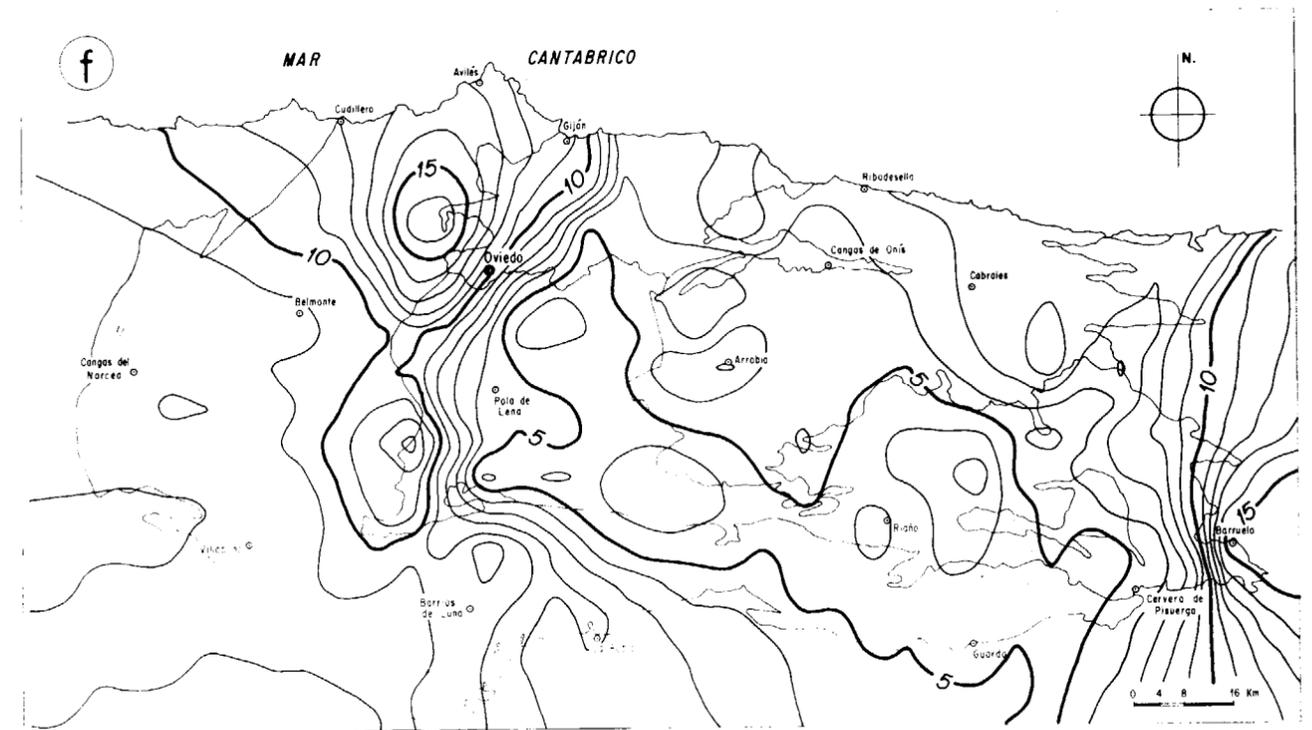
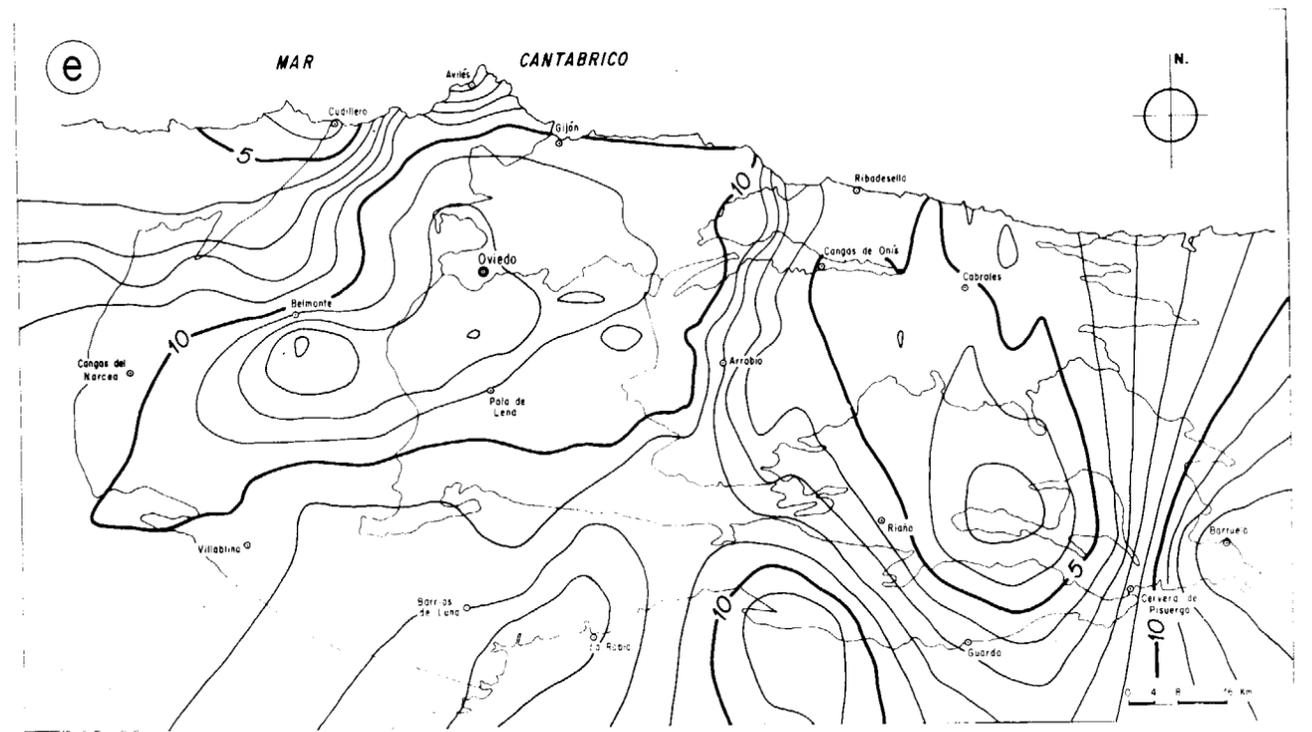
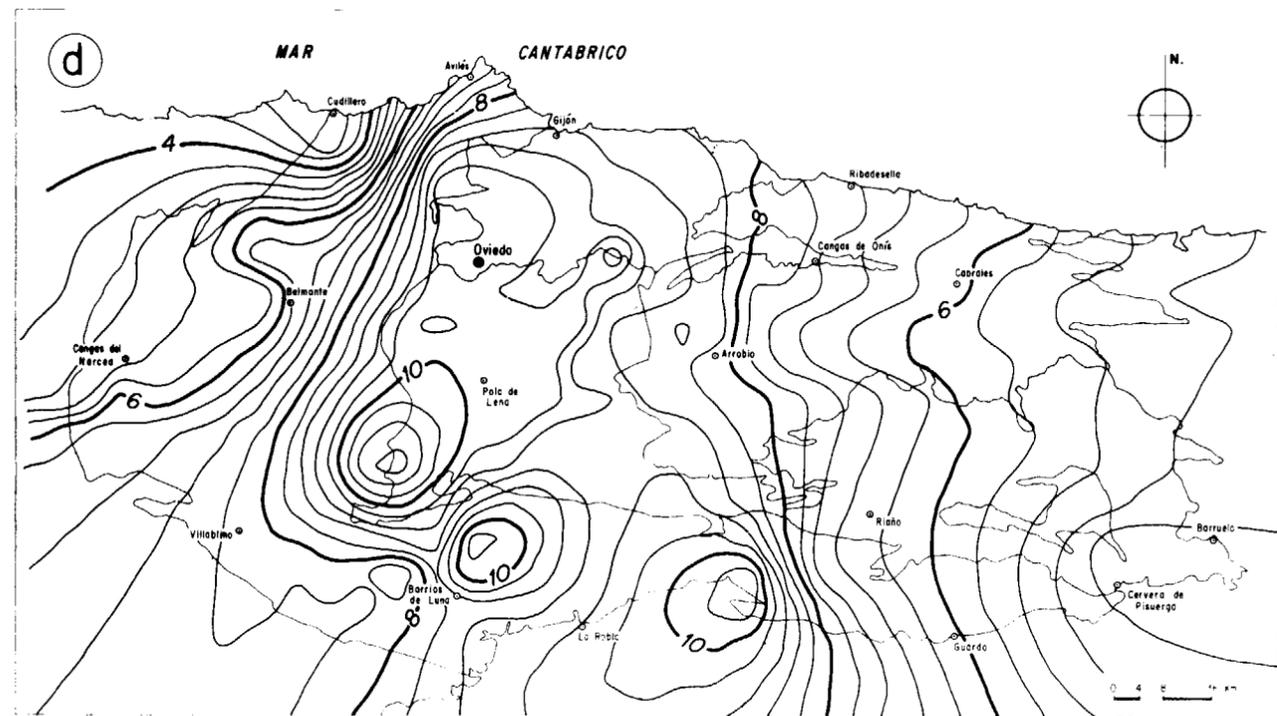
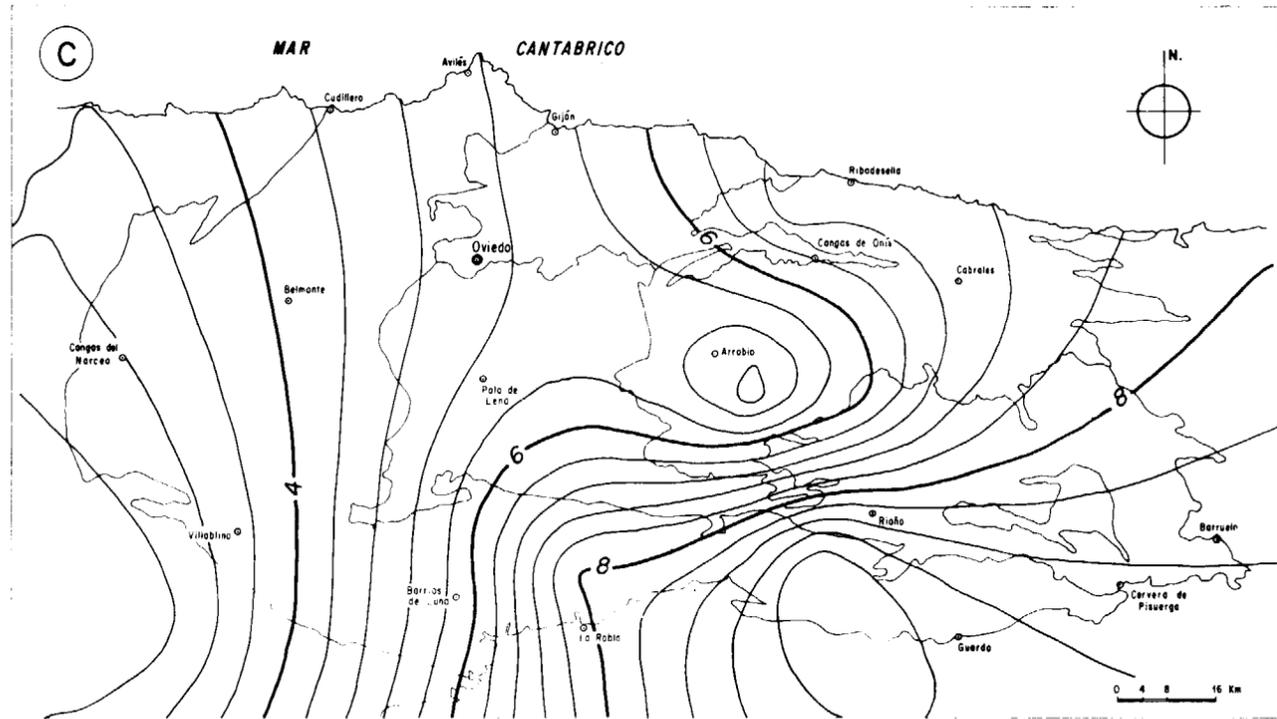


Figura 2.—Diagrama de ESQUEVIN (1969) reflejando la variación de los índices de cristalinidad (IC) de la ilita (KUBLER, 1968) de las muestras estudiadas en función del ambiente metamórfico para cada período estratigráfico. a) Precámbrico. b) Cámbrico. c) Ordovícico. d) Silúrico. e) Devónico. f) Carbonífero Inferior-Medio. g) Carbonífero Superior.





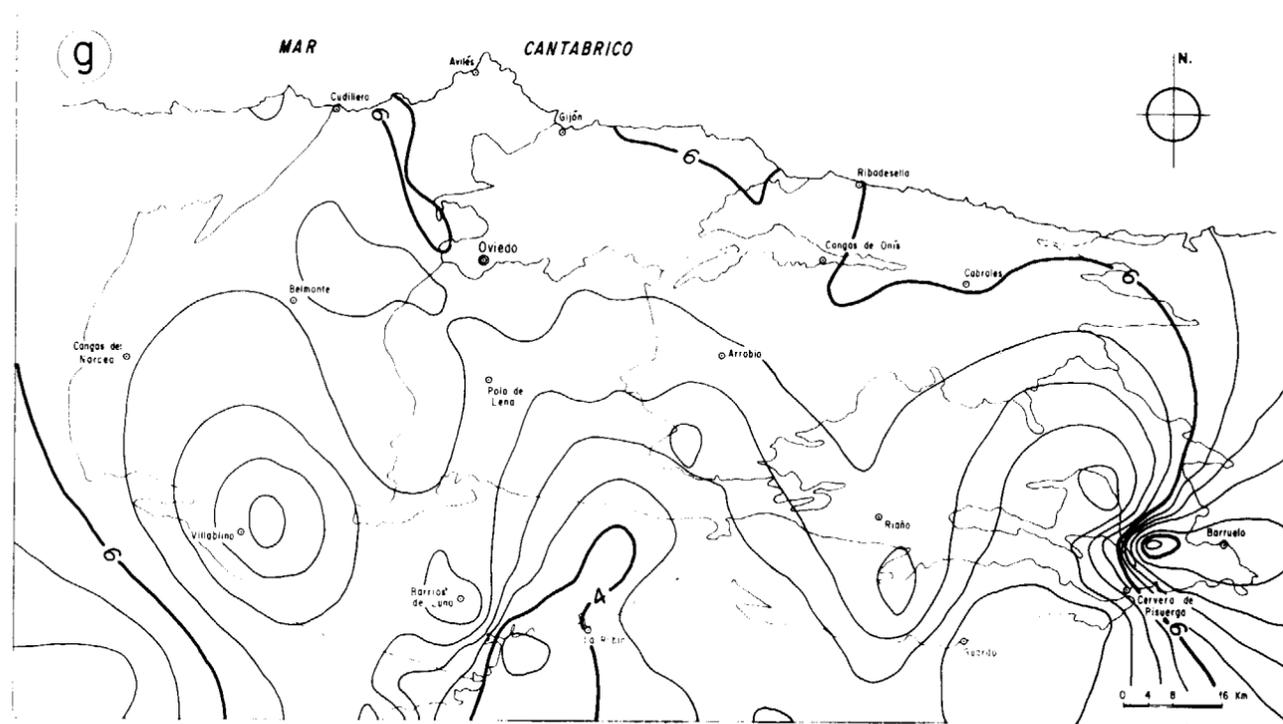


Figura 3.—Distribución de la intensidad del metamorfismo basado en los I.C. de la ilita para cada período estratigráfico: a) Precámbrico. b) Cámbrico. c) Ordovícico. d) Silúrico. e) Devónico. f) Carbonífero Inferior-Medio. g) Carbonífero Superior.

que el Ordovícico refleja la misma situación de aumento del metamorfismo hacia el O y SO, los mínimos se ven desplazados hacia el S y NE.

Mayor complejidad se observa para el Silúrico, en donde los mínimos metamórficos se configuran de acuerdo con la estructura de cerramiento occidental de la Z.C. y el aumento de la intensidad metamórfica se sitúa hacia el este.

El Devónico presenta una distribución heterogénea, con dos zonas de máxima intensidad reflejadas en el área de Cudillero y al este de la localidad de Riaño.

En el Carbonífero Inferior-Medio se refleja un máximo de intensidad en el núcleo de la Cuenca Carbonífera Central y mínimos distribuidos en el sector occidental de la zona y en la cuenca carbonífera de Barruelo, en el extremo suroriental. La irregular distribución en el Carbonífero Superior, sugiere una mayor intensidad metamórfica al oeste de la localidad de La Robla y en las inmediaciones de Barruelo, coincidiendo en este último caso con lo observado para el Carbonífero Inferior.

Si tenemos en cuenta los valores de I.C. que definen el sector anquimetamórfico (3,5 mm a 5,5, mm) y epimetamórfico (<3,5 mm), se puede observar en la misma figura 3 que una amplia zona de la Z.C. presenta ambientes, ya metamórficos, en el Precámbrico, Cámbrico y Ordovícico. En el Silúrico la zona metamórfica queda reducida a dos pequeños sectores en el NO y SE. En el Devónico también hay un mayor carácter diagenético salvo zonas al NO y al este. En el Carbonífero Inferior-Medio el carácter anquizonal se conserva mayoritariamente en toda la Cuenca Carbonífera Central, con gradación a ambientes diagenéticos hacia el oeste y este. En el Carbonífero Superior, el área anquizonal se refleja principalmente en la mitad meridional del Macizo Asturico.

#### PARAGENESIS

Una primera visión de la mineralogía presente en las unidades estratigráficas de la Z.C. (tabla 1) refleja la gran diversidad de las paragénesis, al mismo tiempo que se comprueba la presencia

de idénticas paragénesis en diferentes niveles estratigráficos, confirmando la irregular distribución de la intensidad del metamorfismo en el Paleozoico de la Z.C.

En la tabla 2 se incluyen las paragénesis observadas. La paragénesis (I) con  $Qz+I+K+Ab \pm Cl/V \pm Ctd \pm I/C$  se considera epizonal y asimilable a la subfacies inferior de los esquistos verdes en WINKLER (1965). La presencia de Cloritoide es normal en estas condiciones, al igual que interestratificados  $Cl/V$  e  $I/Cl$ , permitiendo la coexistencia de caolinita,  $Cl/V$  e  $I/Cl$  (THOMPSON, 1970; WEAVER, 1984; FREY, 1984).

TABLA 2  
Paragénesis de las muestras estudiadas

- |      |   |
|------|---|
| I)   | $Q + I + K + C + Ab + C/V \pm Ctd \pm I/C$                            |
| II)  | $Q + I + K + C + FK \pm C/E \pm Ctd \pm I/C \pm P$                    |
| III) | $Q + I + K + C \pm C/V \pm C/E \pm I/C$                               |
| IV)  | $Q + I + K \pm FK \pm Ab \pm C/V \pm V \pm I/C \pm C/E \pm I/E \pm P$ |
| V)   | $Q + I \pm C/E \pm E \pm C/V \pm I/E \pm FK \pm C$                    |

Q	= Cuarzo	
I	= ilita	Interestratificados/
K	= Caolinita	
C	= Clorita	
Ab	= Albita	
FK	= Feldespato K	
E	= Esmectita	
V	= Vermiculita	
P	= Pirofilita	
Ctd	= Cloritoide	

Las condiciones fijadas para esta subfacies, teniendo en cuenta la ausencia de biotita e interestratificados  $I/E$ , se sitúan con  $T$  entre 310-360° y  $P$  próximas a 2-3 Kb, WINKLER (1965); MAXWELL y HOWER (1967), MCDOWELL y ELDERS (1980), MCMECHAN y PRICE (1982), REYES y CARDILE (1989), NOACH et al. (1987).

Esta paragénesis (I) es frecuente en el Precámbrico y Carbonífero, escasa en el Cámbrico y en muestras aisladas del Ordovícico, Silúrico y Devónico (normalmente en zonas de contacto con niveles estratigráficos Carboníferos que la contienen en abundancia).

La paragénesis (II), con  $Qz + I + K + Cl + FK \pm Ctd \pm Cl/E \pm I/Cl \pm Pirofilita$  pertenece igualmente a la subfacies inferior de esquistos ver-

des, pero se ha optado por distinguirla de la (I) en función de la presencia de FK y pirofilita y estar normalmente exenta de albita. El feldespato potásico se encuentra en pequeña cantidad en todas las muestras. La pirofilita se presenta junto al FK pero siempre en ausencia del cloritoide. Esta paragénesis (II) es mayoritaria en el Carbonífero y esporádica en Cámbrico, Ordovícico, Silúrico y Devónico, estando ausente en el Precámbrico. La asociación  $FK + pirofilita$  sólo se encuentra en el Carbonífero (Inferior-Medio y Superior). Las condiciones físicas de esta paragénesis (II) se pueden considerar similares a la (I) (ZEN, 1960, 1961; WINKLER, 1965; VELDE y KORNPROBST, 1969; TSUZUKI y MIZUTANI, 1971; VELINOV et al., 1983, y FREY et al., 1988).

La paragénesis (III) con  $Q + I + K + Cl \pm Cl/E \pm Cl/V \pm I/Cl$  se presenta en todas las unidades estratigráficas pero es más frecuente en zonas del Devónico y Carbonífero Inferior-Medio. Esta asociación representa para MAXWELL y HOWER (1967) unas condiciones variables de 225-310° C aunque MCDOWELL y ELDERS (1980) las limitan a 275-310° C si están ausentes los interestratificados  $I/E$ .

La desaparición de clorita nos permite distinguir a una paragénesis (IV) con  $Q+I+K \pm V \pm Cl/V \pm I/Cl \pm Cl/E$ . Las condiciones de esta paragénesis estarían fuera del campo de estabilidad de la clorita, que está ausente a partir de 200° (WEAVER, 1989), puesto que la asociación ilita+clorita para NOACH et al. (1987) necesita >200. La presencia en mayor o menor medida de pirofilita nos indicaría que estamos próximos al límite inferior de su campo de estabilidad ( $P < 2kb$  y  $T = 200^\circ$ ) (WEAVER, 1984; TSUZUKI y MIZUTANI, 1971; VELINOV et al., 1983; FREY, 1970; MARUMO, 1989). En un solo caso está presente  $I/E$ , por lo que podemos estar próximos a una  $T$  de 200° C, valor que se considera como más normal para su desaparición (ESLINGER y SAVIN, 1973; WEAVER, 1984; HOWER et al., 1976), aunque se admite su existencia hasta los 280° C (PARADIS et al., 1983). En un límite aproximado a los 200° C puede encontrarse la esmectita (WEAVER, 1989).

Los interestratificados  $Cl/V$  son bastante frecuentes en esta paragénesis, presentando unos límites de estabilidad entre 125-190° C (WEAVER, 1984) mientras que los del tipo  $Cl/E$  se aproximan a los 200-230° C (WEAVER, 1989).

Nos encontramos, pues, con una paragénesis (IV) cuyas condiciones físicas pueden situarse en un valor próximo a los 200° C y P < 2 kb.

Las muestras con ausencia total de caolinita y clorita (niveles diagenéticos) quedan reducidas a un número escaso. La asociación mineral (V) es Qz + I por lo que T inferiores a 200° y superior a 140° son presumibles (CLAYTON et al., 1968; DUNOYER DE SEGONZAÇ (1969); AOYAGI y KAZAMA (1980); WEAVER (1989), dependiendo esta variación de la presencia o no de interestratificados como Cl/V, I/E, Cl/E o bien de esmectita y microclina.

**CARACTERISTICAS DEL METAMORFISMO**

Como se indicó anteriormente, una valoración de los I.C. de la illita para los diferentes niveles estratigráficos pone de manifiesto que el Precámbrico, Cámbrico y Ordovícico presentan un desarrollo mayoritario del ambiente epi-anquizonal, en el Silúrico y Devónico es más frecuente el ambiente diagenético y en el Carbonífero el predominio es anquizonal y más reducido epizonal.

Estas variaciones de las condiciones metamórficas y secuencias paragenéticas dentro de cada período definen el proceso metamórfico experimentado por los materiales de la Z.C. como un proceso continuo, con una distribución irregular de su gradiente en el tiempo y espacio.

Un tratamiento conjunto de los valores medios de los I.C. determinados para cada período (tabla 3)

**TABLA 3**

**Valores medios de los índices de cristalinidad (IC) y parámetros 060, para cada período estratigráfico**

	IC	060
Carbonífero Superior	5,25	1,504
Carbonífero Inferior-Medio	6,47	1,502
Devónico	8,74	1,503
Silúrico	7,23	1,502
Ordovícico	6,33	1,502
Cámbrico	5,42	1,505
Precámbrico	3,95	1,506

y representados en el diagrama de ESQUEVIN (fig. 4) pone de manifiesto un metamorfismo decreciente desde el Precámbrico al Devónico y un nuevo aumento de esta intensidad en el Carbonífero.

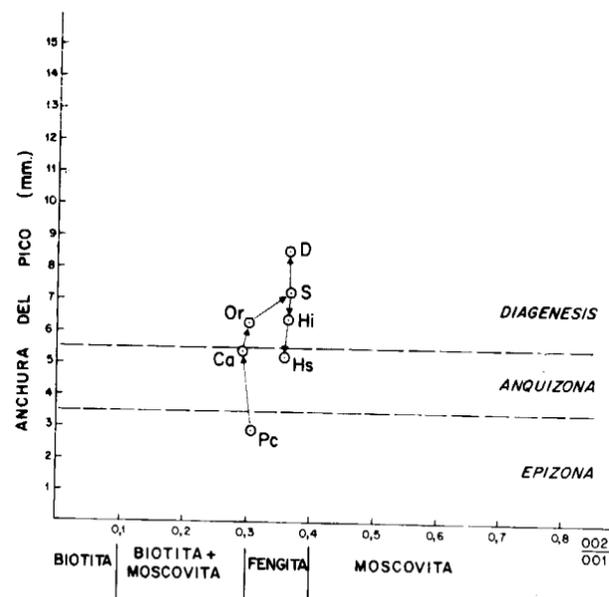


Figura 4.—Diagrama de ESQUEVIN (1969) para los valores medios de los I.C. de la illita en cada período estratigráfico. Pc = Precámbrico. Ca = Cámbrico. Or = Ordovícico. Si = Silúrico. D = Devónico. Hi = Carbonífero Inferior-Medio. Hs = Carbonífero Superior. Los valores medios según tabla 3.

Sin embargo, la correspondencia entre la intensidad del metamorfismo reflejada por los I.C. y la manifestada por las paragénesis no son totalmente concordantes, apreciándose algunas diferencias.

Por otro lado algunos resultados mineralógicos hacen especialmente interesante el metamorfismo de la Z.C. La biotita está ausente en todas las muestras estudiadas, es constante la presencia de caolinita, salvo sectores reducidos, junto a la aparición esporádica de cloritoide y pirofilita, esta última cubriendo un amplio campo de estabilidad. El feldespato K es frecuente aunque en pequeñas cantidades (indicios) pero resulta significativa su aparición constante en el Cámbrico y Carbonífero. Estos resultados de paragénesis y condiciones físicas resultan concordantes con

lo expuesto por GALAN et al. (1985) para el paleozoico de un sector al sur de la Z.C. Para estos autores las paragénesis que encuentran en el Cámbrico, Ordovícico y Carbonífero Superior muestran unas características físicas de 300 a 350° C y 2-3 Kb, mientras que Silúrico, Devónico y Carbonífero Inferior-Medio presentan paragénesis con condiciones próximas a 150° C, 2 Kb, señalando además la presencia constante de la caolinita y más esporádicamente paragonita. Como resultado indican ya la existencia de una inversión metamórfica en el paso Devónico-Carbonífero.

En el estudio realizado por BRIME y PEREZ ESTAUN (1980) y BRIME (1985) en el área de Cabo de Peñas, describen ya una zona de transición de diagénesis a epizona, definiendo el metamorfismo de tipo baja presión y señalando la presencia abundante de caolinita y pirofilita.

La ausencia de montmorillonita es evidente en todos los materiales analizados, hecho que coincide con lo descrito por GUTIERREZ Y TAMARGO (1987) para el sector por ellos estudiado, si bien BRIME (1981) en un estudio sobre el metamorfismo del Paleozoico en las inmediaciones del Pantano de Luna cita montmorillonita junto a caolinita e illita en el Carbonífero.

La aparición de paragonita ha sido señalada precisamente por GALAN et al. (1978), BRIME y PEREZ ESTAUN (1980), GUTIERREZ y TAMARGO (1987) para diferentes áreas, hecho que no se ha podido confirmar en el muestreo realizado en este trabajo, en el que además las rocas presentan siempre un bajo índice de paragonitización.

Tampoco ha sido posible confirmar la observación de ALLER y BRIME (1985), en un corte realizado en la Cuenca Carbonífera Central, en donde indican la desaparición de caolinita y aumento de clorita hacia el sur. Estos mismos autores encuentran feldespato potásico en las pelitas del Carbonífero.

De acuerdo con lo establecido por BRIME y PEREZ ESTAUN (1980) y ALLER et al. (1987), que señalan una transición diagénesis-anquizona-epizona en el área de Cabo Peñas y a la vista de los resultados aquí obtenidos, es evidente que en el ámbito de la Z.C. este tránsito es algo más irregular y heterogéneo que el obtenido en otros

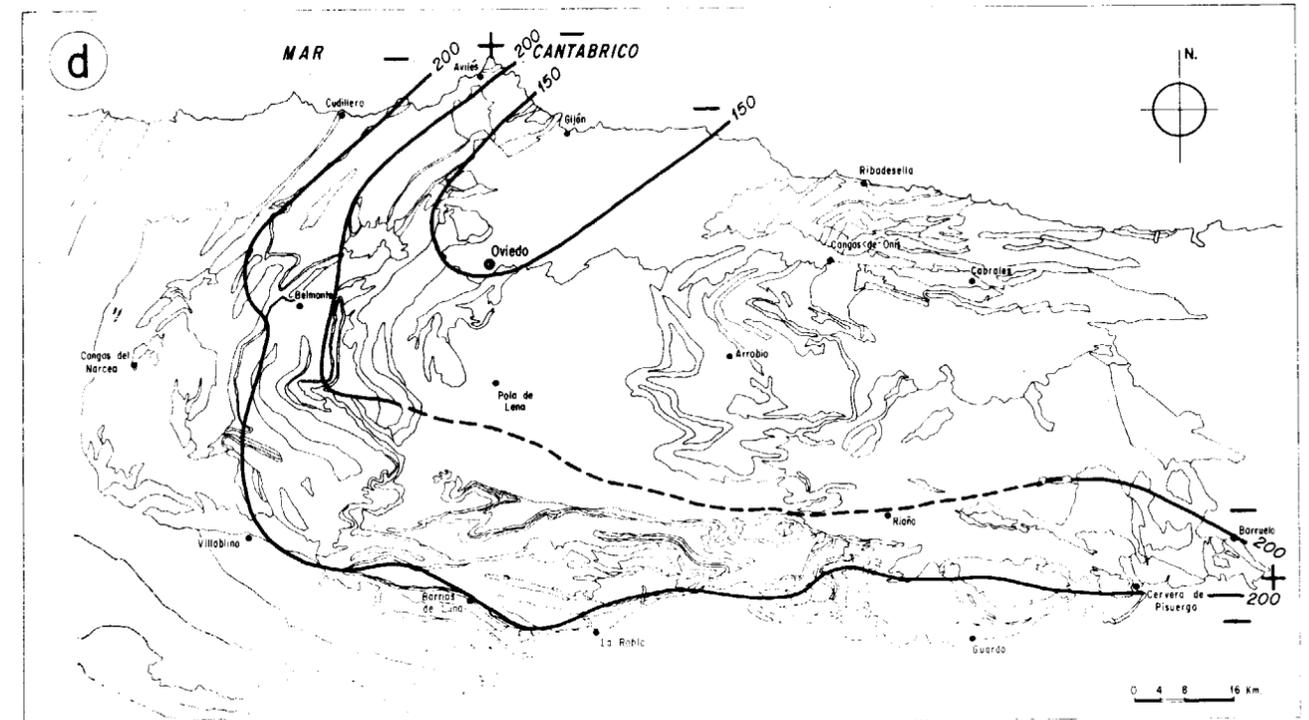
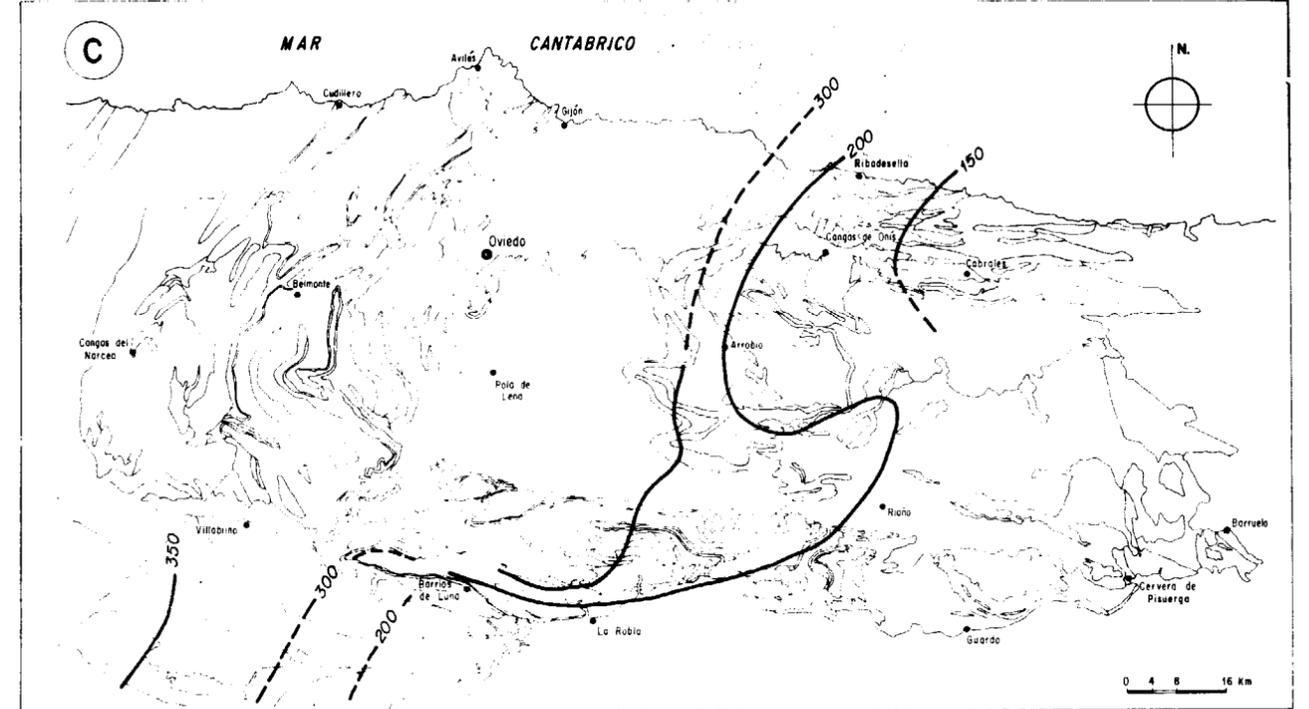
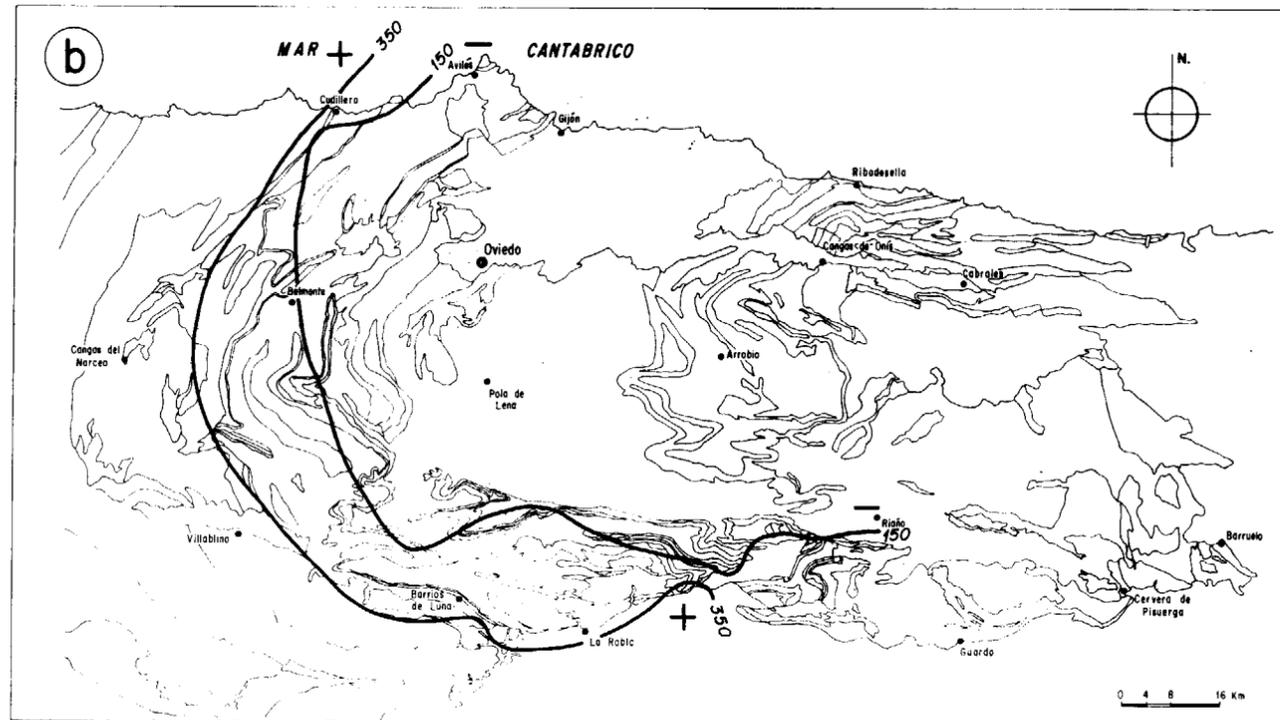
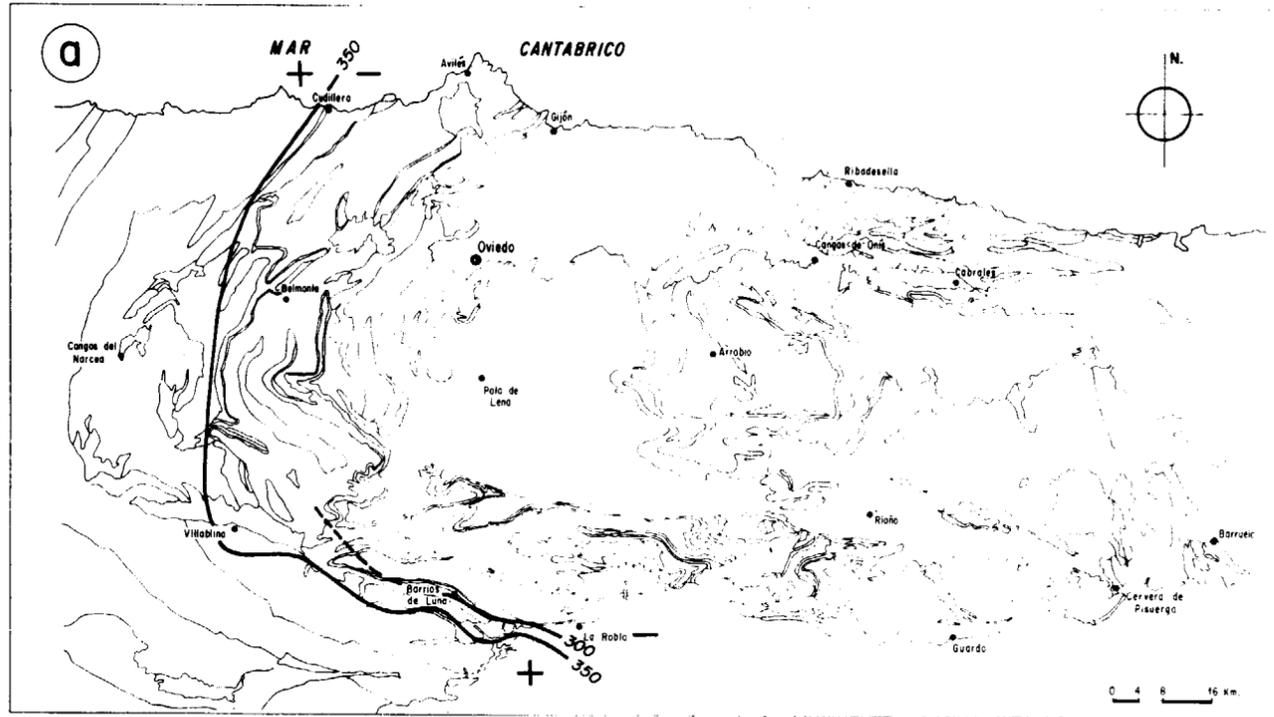
sectores del Macizo Ibérico. Así BRIME (1981) señala la existencia de ambientes diagenéticos y anquizonales en el sector sur de la Z.C.

Por este motivo la asignación que GUTIERREZ y TAMARGO (1987) hacen de determinados minerales a niveles estratigráficos, no parece válida para el conjunto de la Z.C. Así los interestratificados Cl/V no están restringidos al Carbonífero Medio y Superior, sino que su presencia es frecuente en cualquier nivel. La esmectita no se encuentra exclusivamente en el Devónico, pues aunque su presencia es escasa, se ha podido determinar en el Silúrico y Carbonífero. Igualmente la pirofilita la asignan al Carbonífero, mientras que es posible encontrarla también en el Silúrico y Devónico. Contrasta también que estos autores asignen a los interestratificados I/E una presencia constante en todos los niveles, siendo muy escasa en otros sectores de la Z.C.

Aunque el politipo 2M1 de la mica es el más abundante en todos los niveles estratigráficos, un análisis de los valores medios en cada período nos indica que los valores máximos se dan en el conjunto Precámbrico (93,5 por 100), Cámbrico (84 por 100), Ordovícico (88,25 por 100) y Carbonífero (Inferior-Medio 93,69 por 100, Superior 92,18 por 100), bajando estos valores en el Silúrico (80,70 por 100) y Devónico (80,94 por 100), observándose en su variación una relación próxima a la tendencia manifestada por los I.C. de la illita.

Igualmente las variaciones del valor 060 en cada nivel estratigráfico, hace difícil una evaluación del mismo en relación con el proceso metamórfico, pero un cálculo de los valores medios refleja (tabla 3) máximos para el Precámbrico, Cámbrico y Carbonífero Superior, con valores inferiores y similares para Ordovícico, Silúrico, Devónico y Carbonífero Inferior-Medio. La correspondencia existente entre los valores 060 y la presión (SASSI y SCOLARI, 1974) aumentando al incrementarse la presión, nos permite tener una visión general de las fluctuaciones de P en relación con cada período estratigráfico.

De forma aproximativa en la figura 5 se han representado, de acuerdo con las paragénesis estudiadas, los isoterms correspondientes a cada período estratigráfico. A pesar de las diferencias en cuanto a número y extensión de afloramientos, en función de la representatividad de las iso-



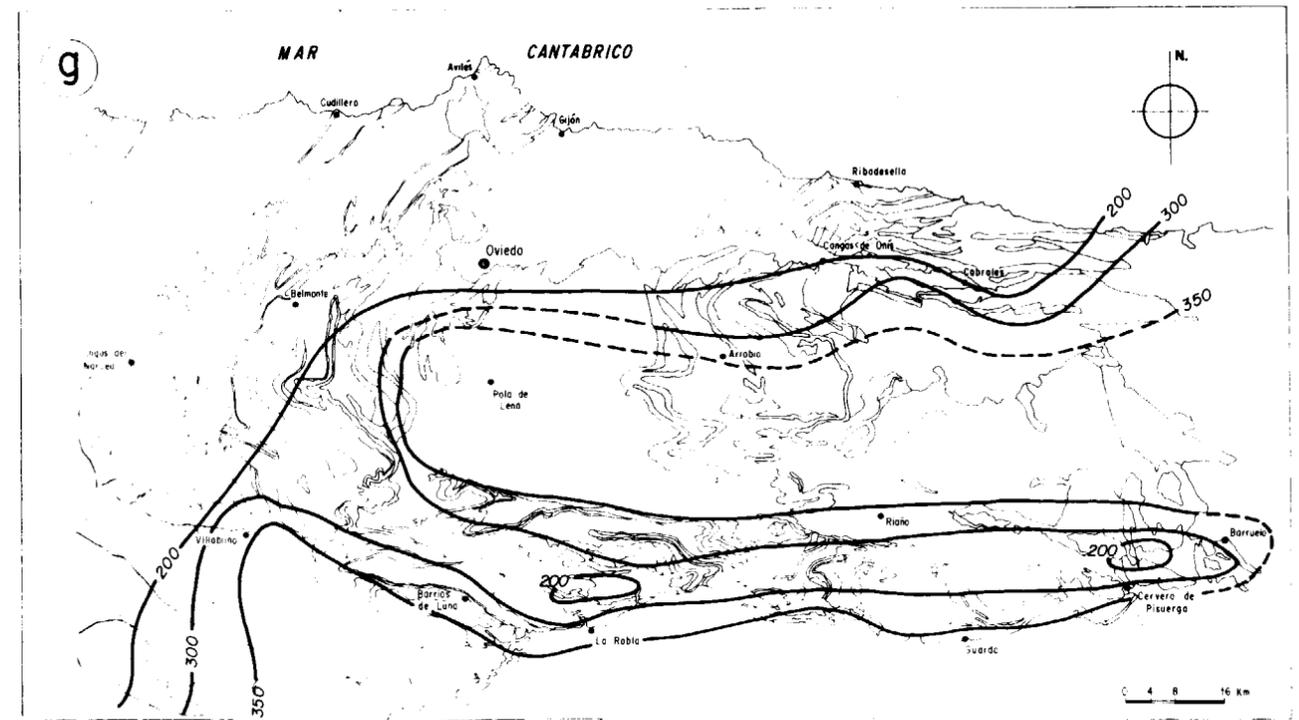
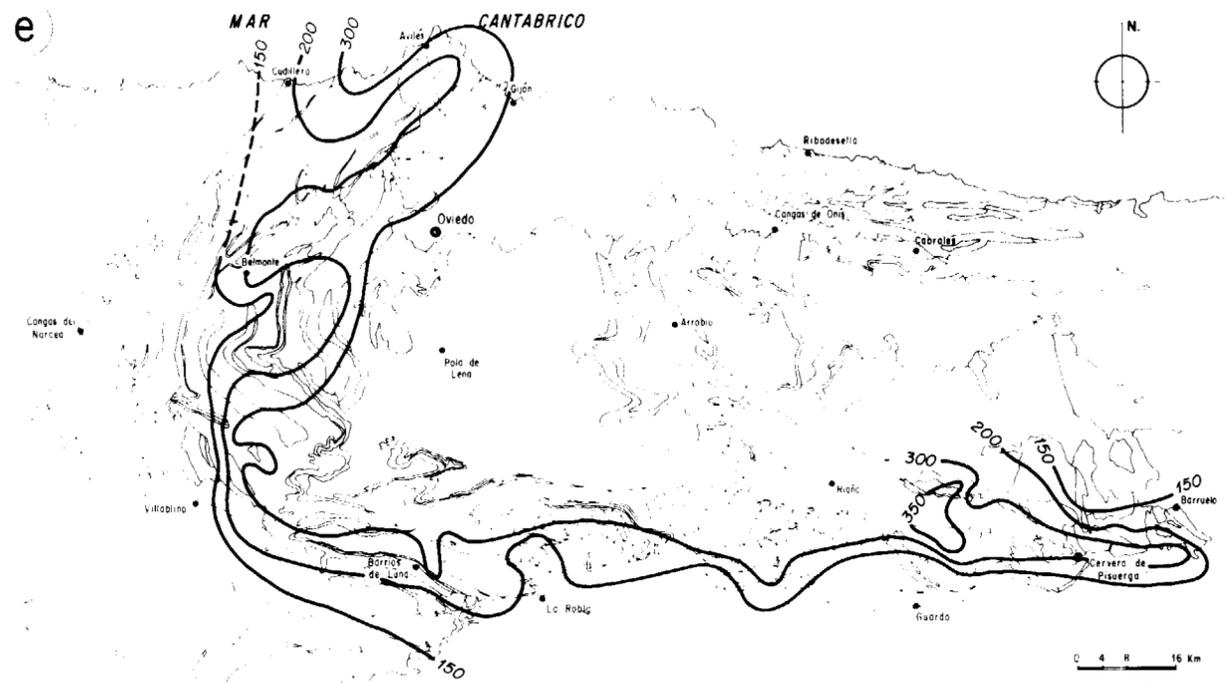
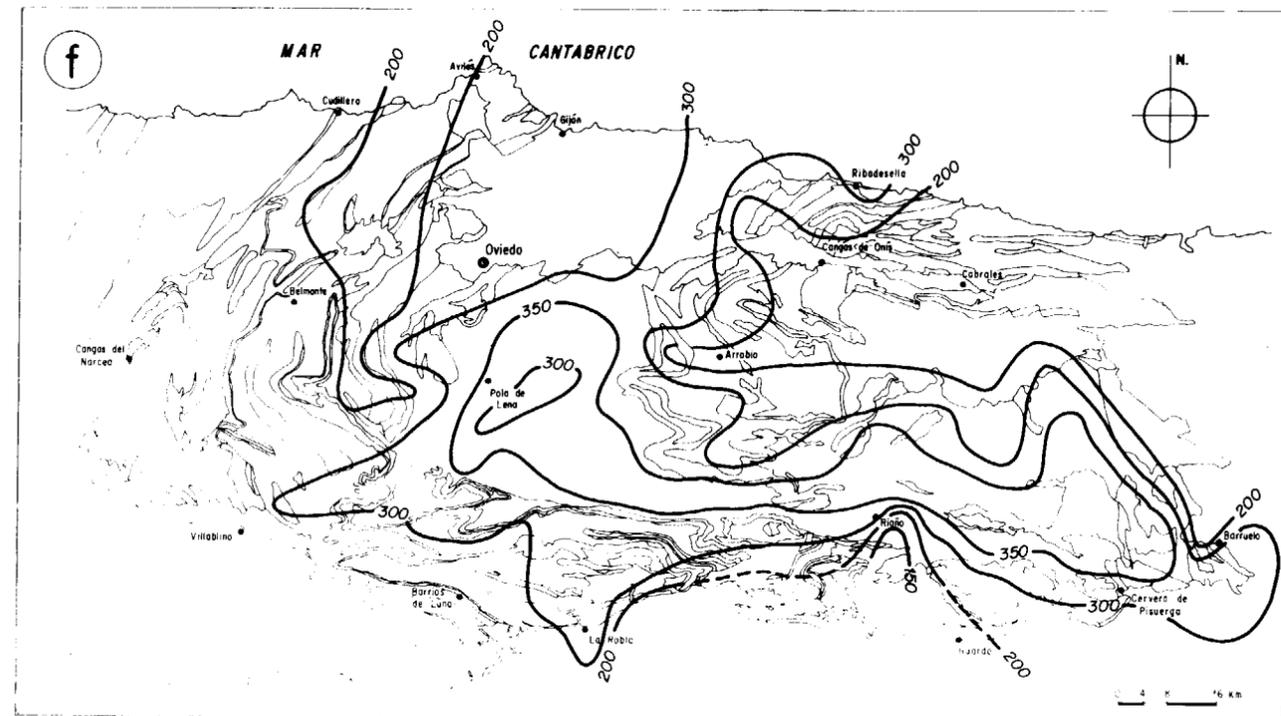


Figura 5.—Representación de isotermas a partir de las paragénesis encontradas en cada periodo estratigráfico: a) Precámbrico. b) Cámbrico. c) Ordovícico. d) Silúrico. e) Devónico. f) Carbonífero Inferior-Medio. g) Carbonífero Superior.



líneas, se observa que en el Precámbrico, Cámbrico y Ordovícico estas isolíneas muestran una tendencia al crecimiento hacia el oeste, con dirección aproximada norte-sur ajustándose a la macroestructura sinclinal de la Z.C.

Esta tendencia cambia a partir del Silúrico, pues aunque las isolíneas se siguen manteniendo adaptadas al trazado de la macroestructura, el crecimiento térmico se verifica en sentido contrario, es decir, hacia el interior de la Cuenca Carbonífera Central, con un desplazamiento de las curvas de mayor temperatura, desde el Silúrico al Carbonífero Superior.

En la figura 6 se han representado las zonas de aparición de minerales significativos del área metamórfica estudiada. La clorita, salvo casos puntuales, se puede considerar representada en todo el área, excepto en pequeños sectores del extremo noroccidental. El feldespato potásico se circunscribe casi al sector de la Cuenca Carbonífera Central y es coincidente en gran parte con el desarrollo de albita, aunque esta última pre-

senta apariciones esporádicas en el sector oriental.

Pirofilita y cloritoide quedan reducidos a sectores mínimos, salvo la pirofilita que en el borde este presenta mayor desarrollo.

#### RELACION CON OTRAS AREAS HERCINICAS

Las propias características del metamorfismo aquí estudiado, junto con su desarrollo a lo largo de una secuencia paleozoica completa, permite poder relacionarlo con el de otras áreas hercínicas con metamorfismo de bajo y muy bajo grado.

Así, en series epizonales del Sistema Central, APARICIO Y GALAN (1978) determinan paragénesis similares a las encontradas aquí (Paragénesis I y II), aunque exentas de caolinita y con indicios de biotita para los materiales estudiados pertenecientes al Cámbrico, y proponen unas

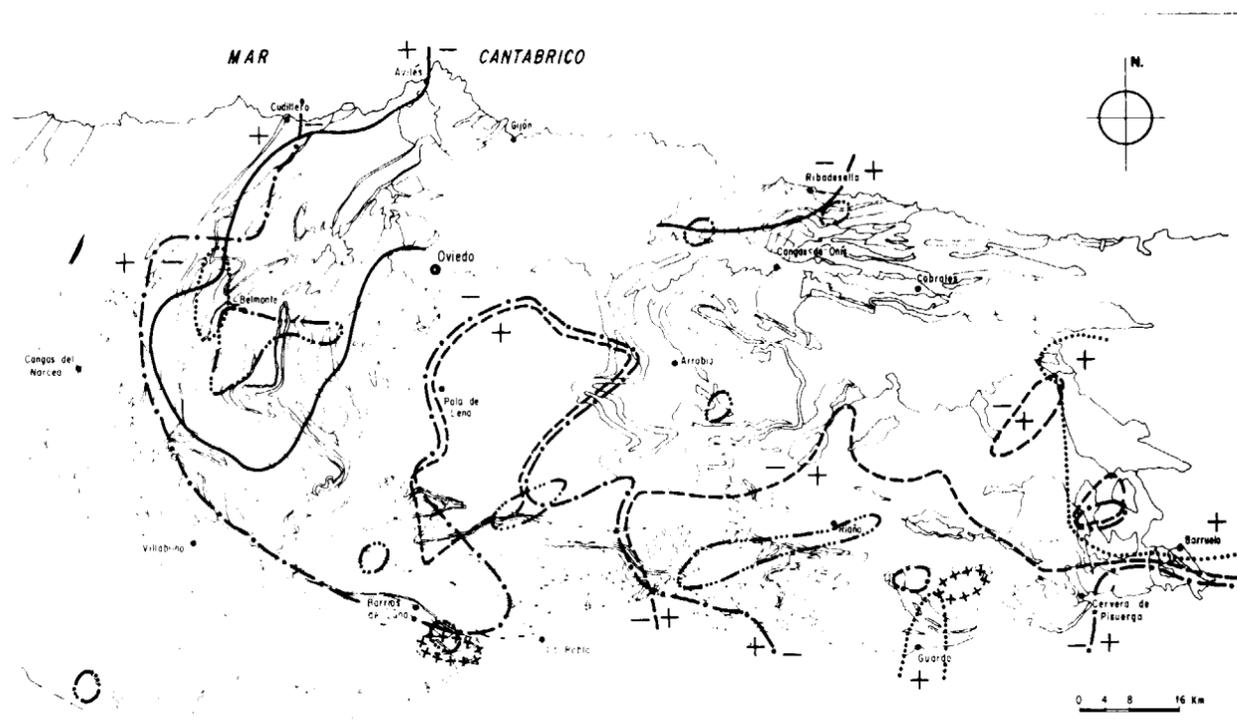


Figura 6.—Representación de las zonas de aparición de los minerales más significativos en el área metamórfica de la Z.C. (+ + + +) Cloritoide, (.....) Pirofilita, (—) Clorita, (— — — —) Feldespato K (— . — . —) Albita y de desaparición de caolinita (...—).

condiciones de P y T ligeramente superiores a las aquí señaladas.

En la Sierra de la Demanda, donde el Cámbrico se encuentra ampliamente representado, APARICIO et al. (1991a) describen paragénesis similares a la (I), ya con caolinita y reflejando ambientes epizonales, estos autores dan unas condiciones de  $T < 350^{\circ}\text{C}$ .

En el sector central de la Cordillera Ibérica y para rocas pertenecientes al Precámbrico y Cámbrico, APARICIO et al. (1991b) describen igualmente paragénesis parecidas a (I) y (II), pudiendo estar presente la biotita y fijando unas condiciones de  $320^{\circ}\text{C}$  y  $P = 2\text{ Kb}$ . Sin embargo, los I.C. de la illita de este sector (para el Precámbrico y Cámbrico) presentan valores medios más altos a los obtenidos en la Z.C. y reflejan siempre un ambiente anquizonal.

En contraposición, el Carbonífero en la Z.C. presenta en muchas zonas paragénesis altas (I y II), indicando condiciones de P-T similares a las en-

contradas en el Paleozoico Inferior de las áreas anteriores, las más elevadas de las descritas hasta ahora en materiales carboníferos para el conjunto del Macizo Ibérico.

En este sentido y para el Sistema Central (APARICIO y GALAN, 1980) dan al Estefaniense  $T \approx 150^{\circ}\text{C}$  y  $P < 1\text{ Kb}$ . En la Sierra de la Demanda, APARICIO et al. (1991a) delimitan unas condiciones para el Carbonífero (Westfaliense) de  $T < 175^{\circ}\text{C}$ , mientras que en la Cordillera Ibérica, APARICIO et al. (1991b) establecen  $T < 200^{\circ}\text{C}$  y  $P < 1\text{ Kb}$ .

En el Carbonífero de Menorca (GARCIA et al, 1992) las condiciones físicas se presentan algo más elevadas con  $T \approx 225\text{-}230^{\circ}\text{C}$  y  $P$  a  $1\text{-}2\text{ Kb}$ , destacando estos autores la existencia de una inversión metamórfica entre el Devónico y Carbonífero con paragénesis similares a (I) y (IV) en el Devónico menorquín. No obstante, se debe tener en cuenta que las paragénesis IV y V, presentes igualmente en el Carbonífero de la Z.C., im-

plican también unas condiciones físicas muy próximas a las indicadas para el Carbonífero de otros sectores.

Algunas de las paragénesis encontradas en el Ordovícico-Silúrico y Devónico de la Z.C. (III, IV y V) son correlacionables a las determinadas para niveles estratigráficos similares en diferentes sectores de la Cordillera Ibérica (APARICIO et al., 1988, 1991a), con T próximas a  $300^{\circ}\text{C}$  y P entre  $1\text{-}2\text{ Kb}$ . El hecho apuntado por APARICIO et al. (1988) para el Ordovícico Medio de Sierra Menora que presenta una intensidad metamórfica inferior al Silúrico, puede tener su correspondencia en el Ordovícico de la Z.C. (paragénesis IV y V), en donde está también ausente la clorita y caolinita (paragénesis V), pudiéndose presentar igualmente una inversión metamórfica en algunos casos.

La presencia de pirofilita, restringida hasta ahora al Silúrico y Devónico del Hercínico Ibérico (APARICIO et al., 1988, 1991b), se extiende al Carbonífero en la Z. C. El cloritoide, citado por APARICIO y GALAN (1978) en el Silúrico del sistema Central y por PEREZ ESTAUN (1978) en el Silúrico de la zona astur occidental leonesa, dentro del ambiente metamórfico de bajo grado, ve ampliado su representación estratigráfica en la Z.C. al Precámbrico, Devónico y Carbonífero Superior, pudiendo estar ya presente en la anquizona (FREY, 1984).

## CONCLUSIONES

- La variabilidad de las paragénesis encontradas en la Z.C. para cada período estratigráfico contrasta con la evolución del metamorfismo en otras áreas del Macizo Ibérico con ambientes metamórficos de Bajo y Muy Bajo grado.
- Los valores de los I.C. de Kubler en consonancia con la variabilidad de las paragénesis, muestra una gran dispersión para cada nivel estratigráfico; encontrándose de forma general unos valores medios de los I.C. superiores a los determinados en los mismos niveles estratigráficos de otras áreas del sector Hercínico Ibérico.
- Se observa, al igual que en otros sectores

del Macizo Ibérico, una inversión metamórfica entre el Devónico y el Carbonífero.

- Se considera significativo la aparición de cloritoide y pirofilita en niveles estratigráficos en los que hasta ahora estos minerales no habían sido descritos, así como la presencia casi constante de caolinita y feldespato potásico, especialmente este último en el Cámbrico y Carbonífero.

## AGRADECIMIENTOS

A J. L. Casaseca por su valiosa ayuda en los trabajos de campo. A M. C. Sendra por la composición del trabajo. A J. Arroyo por delineación y a A. Vitoria, M. Castillejo y A. Fernández por los trabajos de laboratorio, especialmente a V. Calleja por la labor informática.

Finalmente, a todas aquellas personas «anónimas» que de una manera u otra contribuyeron a la elaboración y financiación de este trabajo.

## REFERENCIAS

- ALLER, J.; BASTIDA, F.; BRIME, C., y PEREZ ESTAUN, A. (1987): *Cleavage and its relation with metamorphic grade in the Cantabrian zone (Hercynian of North-West Spain)*. Geol. Bull., 40, 255-272.
- ALLER, J., y BRIME, C. (1985): *Deformación y metamorfismo en la parte sur de la Cuenca Carbonífera Central (NO de España)*. Proceedings 10th International Congress of Carboniferous Stratigraphy and Geology. Ed. IGME, tomo 3. Madrid, 541-548.
- AOYAGI, K., y KAZAMA, T. (1980): *Transformational changes of clay minerals zeolites and silica minerals during diagenesis*. Sedimentology, 27, 179-188.
- APARICIO, A.; BRELL, J. M., y DOVAL, M. (1988): *El metamorfismo de los afloramientos paleozoicos de la Sierra de Rata, Mojón Alto, Albarracín, Menora y Ventosa en la Cordillera Ibérica (provincias de Guadalajara y Teruel)*. Bol. Geol. Min., 99, 847-854.
- APARICIO, A.; BRELL, J. M., y GUARAS, B. (1991a): *El metamorfismo hercínico de la Sierra de la Demanda (provincias de Logroño y Burgos)*. Bol. Geol. Min., 102, 240-246.
- APARICIO, A.; BRELL, J. M.; GARCIA, R.; TENA, J., y GOMEZ, J. (1991b): *El metamorfismo de bajo grado en el Paleozoico del sector central de la Cordillera Ibérica*. Bol. Geol. Min., 102, 735-747.
- APARICIO, A., y GALAN, E. (1978): *El metamorfismo de*

bajo grado en el área central del Macizo Hespérico Español (Sistema Central - Toledo). Bol. Geol. Min., 89, 475-486.

APARICIO, A., y GALAN, E. (1980): Las características del metamorfismo hercínico de bajo y muy bajo grado en el sector oriental del Sistema Central (provincia de Guadalupe). Est. Geol., 36, 75-84.

BEVINS, R.; ALDERTON, D. H. M., y HORAK, J. M. (1988): Chloritoid from low-grade pelitic rocks in North-Wales. Min. Mag., 52, 394-396.

BRIME, C. (1981): Post depositional transformation of clays in Paleozoic rocks of Northwest Spain. Clay Minerals, 16, 421-424.

BRIME, C. (1985): A diagenesis to metamorphism transition in the Hercynian of north-west Spain. Min. Mag., 49, 481-484.

BRIME, C., y PEREZ ESTAUN, A. (1980): La transición diagenesis-metamorfismo en la región de Cabo de Peñas. Cuad. Lab. Geológico de Laxe, 1, 85-97.

CLAYTON, R. N., MUFFER, L. J. P., y WHITE, D. E. (1968): Oxygen isotope study of calcite and silicates of the River Ranch N 01 Well Salton Sea Geothermal field, California. Amer. J. Sci., 266, 968-979.

DUNOYER DE SEGONZAÇ, G. (1969): Les minéraux argileux dans la diagenèse passage au métamorphisme. Mem. du service de la carte géologique d'Alsace et de Lorraine, 29, 317 pp.

ESLINGER, E., y SAVIN, S. M. (1973): Mineralogy and oxygen isotope geochemistry of the hydrothermally altered rocks of the Ohaki-Broadlands New Zealand geothermal area. Am. J. Sci., 273, 240-267.

ESQUEVIN, J. (1969): Influence de la composition chimique des illites sur leur cristallinité. Bull. Centre Rech. Pau SNAPA, 3, 147-154.

FREY, M. (1970): The step from diagenesis to metamorphism in pelitic rocks during alpine orogenesis. Sedimentology, 15, 261-279.

FREY, M. (1984): Very low-grade metamorphism of clastic sedimentary rocks. En: Low temperature metamorphism. Ed. Frey M., Blackie & Son Ltd. Glasgow, 9-58.

FREY, M.; SAUNDERS, J., y SCHWANDER, H. (1988): The mineralogy and metamorphic geology of low-grade sediments, Northhorn Range, Trinidad. Journal of Geological Society, 145, 563-576.

GALAN, E.; APARICIO, A., y DOVAL, M. (1985): Characteristics of the Hercynian Metamorphism in the Pola de Gordon Matallana Coal basin, Leon Province, Spain. Proceedings Clays and Clay Minerals, 29-A, 352-353.

GALAN, E.; APARICIO, A., y VILLEGAS, F. (1978): El metamorfismo de muy bajo grado (anquimetamorfismo) de la cuenca carbonífera Ciñera-Matallana (provincia de León). Est. Geol., 34, 505-510.

GARCIA, R.; BRELL, J. M., y APARICIO, A. (1992): El metamorfismo del Paleozoico de la Isla de Menorca. Bol. Geol. Min., 103, 564-569.

GUTIERREZ, M., y TAMARGO, J. L. (1987): Características mineralógicas y geoquímicas de las pizarras de la vertiente meridional de la zona Cantábrica (NO de España). Bol. Geol. Min., 98, 82-99.

HOWER, J.; ESLINGER, E. V.; HOWER, M. E., y PERRY, E. A. (1976): Mechanism of burial metamorphism of argillaceous sediment, 1 Mineralogical and Chemical evidence. Geol. Soc. Amer. Bull., 87, 725-737.

JULIVERT, M. (1983a): La estructura de la zona Cantábrica. En Geología de España, tomo 1, 339-380.

JULIVERT, M. (1983b): El Carbonífero: evolución de la sedimentación y desarrollo de la orogénesis hercíniana. En: Geología de España, tomo 1, IGME, 311-338.

JULIVERT, M. (1983c): Los tiempos precámbricos y paleozoicos. El ciclo Hercínico. Generalidades. En: Geología de España, tomo 1, IGME. Madrid, 59-72.

JULIVERT, M., y TRUYOLS, J. (1983): El Ordovícico en el Macizo Ibérico. En: Geología de España, tomo 1, IGME, 192-245.

JULIVERT, M.; TRUYOLS, J., y VERGES, J. (1983): El Devónico en el Macizo Ibérico. En: Geología de España, tomo 1, IGME, 265-310.

KISCH, H. J. (1991): Illite crystallinity: recommendations on sample preparation, X-ray diffraction setting and interlaboratory samples. Journal of metamorphic geology, 9, 665-670.

KUBLER, B. (1968): Evaluation quantitative de métamorphisme par la cristallinité de l'illite. Etat des progrès réalisés ces dernières années. Bull. Centre, Rech. Pau SNPA, 2, 385-397.

MARTINEZ, F. J., y GIL IBARGUCHI, I. (1983): El Metamorfismo en el Macizo Ibérico. En: Geología de España, tomo 1, IGME. Madrid, 555-569.

MARUMO, K. (1989): Genesis of kaolin minerals and pyrophyllite in kuroko deposits of Japan: Implications for the origins of the hydrothermal fluids from mineralogical and stable isotope data. Geochimica et Cosmochimica Acta, 53, 2915-2924.

MAXWELL, D. T., y HOWER, J. (1967): High-grade diagenesis and low-grade metamorphism of illite in the Precambrian belt series. Amer. Min., 52, 843-857.

MCDOWELL, S. D., y ELDERS, W. A. (1980): Authigenic layer silicate minerals in borehole Elmore 1, Salton Sea geothermal field, California USA. Contr. Min. Petr., 74, 293-310.

MCMECHAN, M. E., y PRICE, R. A. (1982): Superimposed low-grade metamorphism in the Mount Fisher area southeastern British Columbia. Implications for the East Kootenay Orogeny. Can. J. Earth. Sci. 19, 476-489.

NOACH, Y.; GIROIR, G., y GIRARD, J. P. (1987): Chlorites as indicators of Paleoenvironments. En: Geochemistry and mineral formation in the Earth surface. Ed. R. Rodríguez, Y. Tardy. CSIC-CNRS, 639-652.

PARADIS, S.; VELDE, B., y NICOL, E. (1983): Chloritoid—Pyrophyllite—Rectorite facies rocks from Brittany, France. Contr. Min. Petr., 83, 342-347.

PEREZ ESTAUN, A. (1973): Datos sobre la sucesión estratigráfica del Precámbrico y la estructura del extremo sur del antiforme del Narcea (NO de España). Brevioria Geológica Asturica, 17, 5-16.

PEREZ-ESTAUN, A. (1978): Estratigrafía y estructura de la rama S. de la zona asturoccidental leonesa. Mem. Inst. Geol. Min. Esp., 92, 151 pp.

PEREZ ESTAUN, A., y BASTIDA, F. (1990): Cantabrian zone: structure. En Pre-mesozoic Geology of Iberia. Ed. R. Dallmeyer, E. Martínez García. Springer, Berlín.

PEREZ ESTAUN, A.; BASTIDA, F.; ALONSO, J. L.; MARQUINEZ, J.; ALLER, J.; ALVAREZ-MARRON, J.; MARCOS, A., y PULGAR, J. A. (1988): A thin-skinned tectonics model for an arcuate fold and thrust belt: The Cantabrian zone. Tectonics, 7, 517-538.

PEREZ-ESTAUN, A.; BASTIDA, F.; ALONSO, J. L.; MARQUINEZ, J.; ALLER, J.; ALVAREZ MARRON, J.; MARCOS, A., y PULGAR, J. A. (1991): The Cantabrian zone an interpretation for an arcuate foreland thrust belt. Tectonophysics, 191, p. 435.

REYES, A. G., y CARDILE, C. M. (1989): Characterization of clay scales forming in Philippine geothermal wells. Geothermics, 18, 429-446.

RODRIGUEZ-FERNANDEZ, L. R. (1983): Evolución estructural de la zona cantábrica durante el Carbonífero. En: Carbonífero y Pérmico de España. IGME. Madrid, 151-162.

SANCHEZ DE LA TORRE, L.; AGUEDA VILLAR, J. A.; COLMENERO NAVARRO, J. R.; GARCIA RAMOS, J. C., y GONZALEZ LASTRA, J. (1983): Evolución sedimentaria y paleogeográfica del Carbonífero en la Cordillera Cantábrica. En: Carbonífero y Pérmico de España. IGME. Madrid, 133-150.

SASSI, F. P., y SCOLARI, A. (1974): The  $b_0$  value of the potassic white micas as a barometric indicator in low-

grade metamorphism of pelitic schists. Contr. Min. Petr., 45, 143-152.

THOMPSON, A. B. (1970): A note on the kaolinite pyrophyllite equilibrium. Am. J. Sci., 268, 454-458.

TRUYOLS, J. (1983): El Carbonífero del NO de España. Introducción. En: Carbonífero y Pérmico de España. IGME. Madrid, 25-30.

TRUYOLS, J., y JULIVERT, M. (1983): El Silúrico en el Macizo Ibérico. En: Geología de España, tomo 1. IGME. 246-264.

TSUZUKI, Y., MIZUTANI, S. (1971): A study of rock alteration process based on kinetics of hydrothermal experiment. Contr. Min. Petr. 30, 15-33.

VELINOV, I.; GOROVA, M.; TCHOLAKOV, P.; TCHOUNER, D., e IANEVA, I. (1983): Secondary quartzites developed after Cretaceous volcanics from Zaza zone, Cuba. Geologica balcanica, 13, 6, 53-68.

VELDE, B., y KORNPROBST, J. (1969): Stabilité des silicates d'alumine hydratés. Contr. Min. Petr., 21, 63-74.

WEAVER, Ch. E. (1960): Possible uses of minerals in search for oil. Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol., 44.

WEAVER, Ch. E. (1984): Shale-slate metamorphism in southern Appalachians. Developments in Petrology, 10, Elsevier. Nueva York, 239 pp.

WEAVER, Ch. E. (1989): Clays, Muds and Shales. Developments in sedimentology, 44, Elsevier. Nueva York, 819 pp.

WINKLER, H. G. H. (1965): Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer-Verlag. New York. 220 pp.

ZAMARREÑO, I. (1983): El Cámbrico en el Macizo Ibérico. En: Geología de España, tomo 1. IGME. 117-191.

ZEN, E. an (1960): Metamorphism of Lower Paleozoic rocks in the vicinity of the Taconic range in West-central Vermont. Amer. Min., 45, 129-175.

ZEN, E. an (1961): Mineralogy and Petrology of the system Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O in some pyrophyllite deposits of North Carolina. Amer. Miner., 46, 52-66.

Original recibido: Junio de 1992.

Original aceptado: Enero de 1993.

# INFORMACION

## Libros

### JORNADAS DE AGUAS MINERALES Y MINERO-MEDICINALES EN ESPAÑA

Especialistas en diversas materias abordan los diferentes aspectos bajo los cuales se pueden examinar las aguas Minerales y Minero-Medicinales.

Las ponencias que recoge esta publicación, editada por el ITGE dentro de su colección «Temas Geológico-Mineros», son las siguientes:

#### Conceptos Básicos de Hidrogeología (A. Navarro)

El autor trata de exponer unas nociones sobre hidrogeología que puedan servir de conocimientos básicos sobre este tema, con el fin de familiarizar con algunos aspectos contemplados en las siguientes ponencias.

#### Caracterización hidrogeológica de las aguas minerales y minero-medicinales (M. R. Llamas)

Se presenta en esta ponencia cuestiones de carácter hidrogeológico o físico-químico que el autor ha considerado de interés tanto para la aplicación de la nueva legislación, así como para sugerir algunas posibles modificaciones de la correspondiente Directiva Comunitaria, actualmente en revisión.

#### Infraestructura hidrotermal (J. I. Pinuaga)

Bajo el punto de vista hidrogeológico el ponente analiza: *El origen del calor*. Origen de las aguas termales y mecanismos de surgencia en estas aguas.

#### Metodología de los perímetros de protección de las aguas Minerales y Minero-Medicinales (G. López Arechavala)

Después de resumir la normativa vigente al respecto, el autor destaca las peculiaridades de la protección cualitativa (contra la contaminación) y cuantitativa (frente a

«afecciones») de las *aguas minerales*, y expone los criterios y las técnicas de estudio aplicables en las tres situaciones más características de ese tipo de aguas subterráneas: manantiales (S.STR.) y galerías en contextos hidrogeológicos e hidrodinámicos relativamente sencillos, sondeos en acuíferos extensivos, y sistemas de flujo subterráneo, profundo, presurizado y ascendente.

#### Nuevas tendencias en las técnicas analíticas de las aguas (F. Armijo)

El autor pone de manifiesto la evolución que ha tenido en los últimos años las técnicas analíticas aplicadas a las aguas, basándonos en la información de normativas oficiales y en novedades y mejoras introducidas por investigadores y fabricantes de equipos.

#### Revisión de parámetros contaminantes en relación a la propuesta de actualización de la Directiva Comunitaria Aguas Minerales naturales (B. Oliver-Rodes)

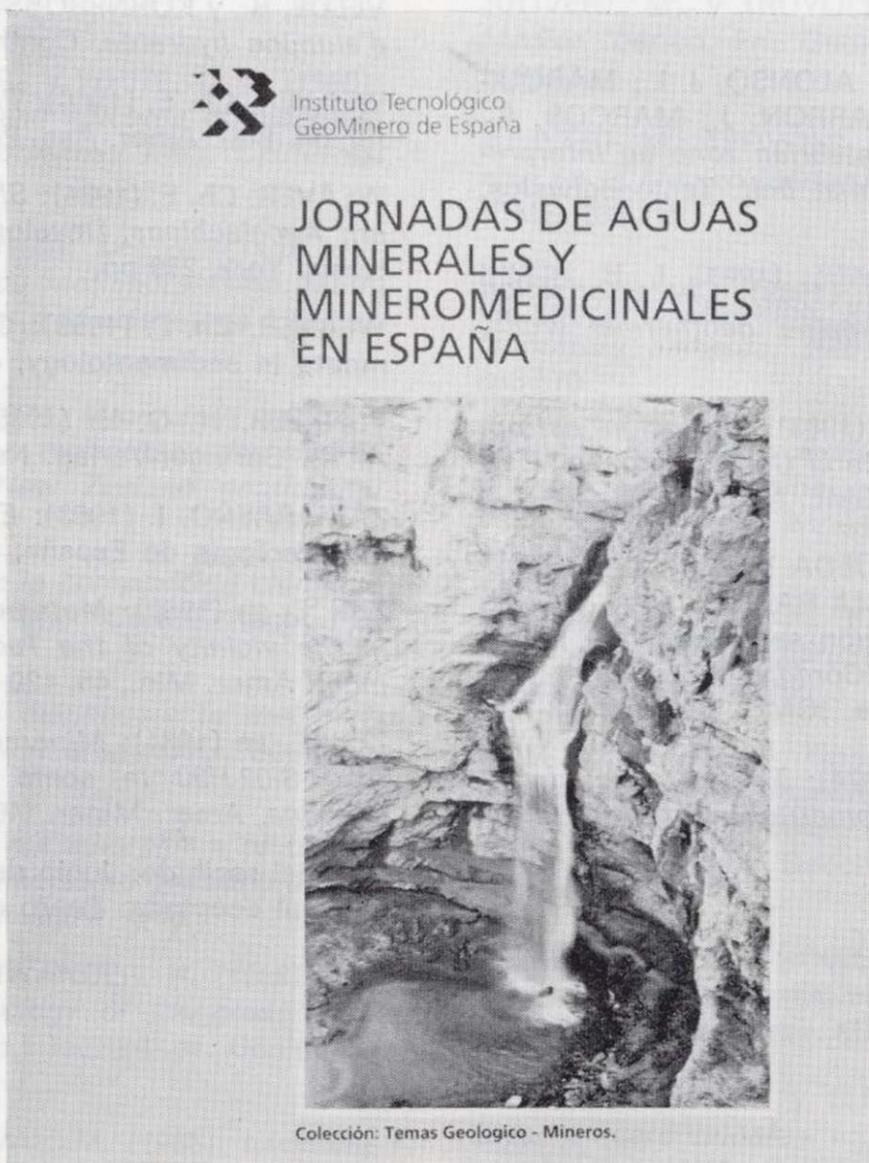
El autor analiza los criterios de calidad que se establecieron en la reglamentación técnico-sanitaria sobre aguas de bebida envasadas actualmente en vigor, poniendo de manifiesto el considerable retraso que supone respecto al continuo avance de la técnica y de la epidemiología.

Efectúa un detallado análisis de los parámetros considerados como contaminantes y la

problemática que presenta la aplicación de la reglamentación anteriormente citada, debido a algunas indefiniciones de la misma.

#### Problemática de la Reglamentación Técnico-Sanitaria de las aguas de bebida envasadas en sus aspectos microbiológicos (M.<sup>a</sup> Carmen de la Rosa)

La ponente analiza en su exposición los aspectos micro-



Colección: Temas Geológico - Mineros.

# INFORMACION

## Libros

### JORNADAS DE AGUAS MINERALES Y MINERO-MEDICINALES EN ESPAÑA

Especialistas en diversas materias abordan los diferentes aspectos bajo los cuales se pueden examinar las aguas Minerales y Minero-Medicinales.

Las ponencias que recoge esta publicación, editada por el ITGE dentro de su colección «Temas Geológico-Mineros», son las siguientes:

#### Conceptos Básicos de Hidrogeología (A. Navarro)

El autor trata de exponer unas nociones sobre hidrogeología que puedan servir de conocimientos básicos sobre este tema, con el fin de familiarizar con algunos aspectos contemplados en las siguientes ponencias.

#### Caracterización hidrogeológica de las aguas minerales y minero-medicinales (M. R. Llamas)

Se presenta en esta ponencia cuestiones de carácter hidrogeológico o físico-químico que el autor ha considerado de interés tanto para la aplicación de la nueva legislación, así como para sugerir algunas posibles modificaciones de la correspondiente Directiva Comunitaria, actualmente en revisión.

#### Infraestructura hidrotermal (J. I. Pinuaga)

Bajo el punto de vista hidrogeológico el ponente analiza: *El origen del calor*. Origen de las aguas termales y mecanismos de surgencia en estas aguas.

#### Metodología de los perimetros de protección de las aguas Minerales y Minero-Medicinales (G. López Arechavala)

Después de resumir la normativa vigente al respecto, el autor destaca las peculiaridades de la protección cualitativa (contra la contaminación) y cuantitativa (frente a

«afecciones») de las *aguas minerales*, y expone los criterios y las técnicas de estudio aplicables en las tres situaciones más características de ese tipo de aguas subterráneas: manantiales (S.STR.) y galerías en contextos hidrogeológicos e hidrodinámicos relativamente sencillos, sondeos en acuíferos extensivos, y sistemas de flujo subterráneo, profundo, presurizado y ascendente.

#### Nuevas tendencias en las técnicas analíticas de las aguas (F. Armijo)

El autor pone de manifiesto la evolución que ha tenido en los últimos años las técnicas analíticas aplicadas a las aguas, basándose en la información de normativas oficiales y en novedades y mejoras introducidas por investigadores y fabricantes de equipos.

#### Revisión de parámetros contaminantes en relación a la propuesta de actualización de la Directiva Comunitaria Aguas Minerales naturales (B. Oliver-Rodes)

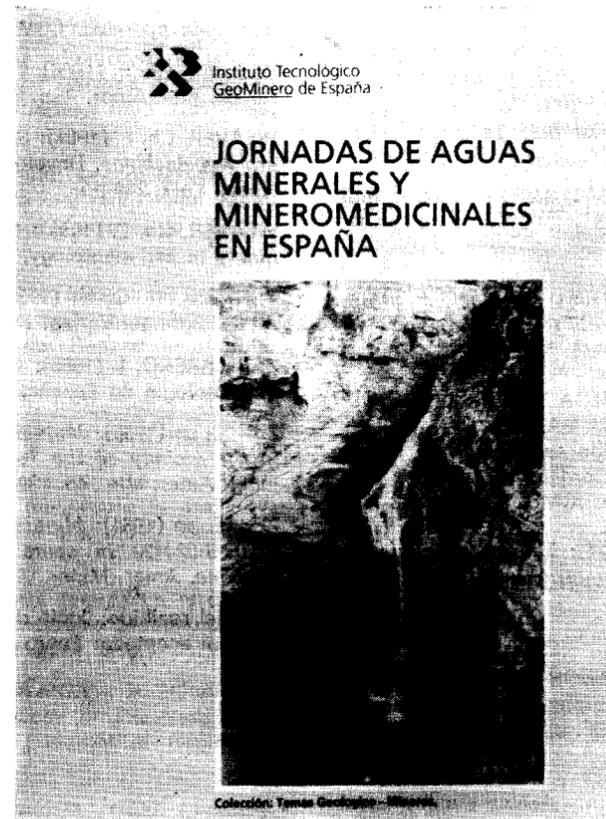
El autor analiza los criterios de calidad que se establecieron en la reglamentación técnico-sanitaria sobre aguas de bebida envasadas actualmente en vigor, poniendo de manifiesto el considerable retraso que supone respecto al continuo avance de la técnica y de la epidermiología.

Efectúa un detallado análisis de los parámetros considerados como contaminantes y la

problemática que presenta la aplicación de la reglamentación anteriormente citada, debido a algunas indefiniciones de la misma.

#### Problemática de la Reglamentación Técnico-Sanitaria de las aguas de bebida envasadas en sus aspectos microbiológicos (M.<sup>a</sup> Carmen de la Rosa)

La ponente analiza en su exposición los aspectos micro-



biológicos contemplados en la actual Reglamentación Técnico-Sanitaria, poniendo de manifiesto los diversos problemas que supone su estricto cumplimiento.

#### Aguas Minerales y Minero-Medicinales. Mecanismos básicos de acción (M. Armijo Valenzuela)

En el apartado medicinal que este tipo de aguas puede ejercer sobre el organismo humano, el autor analiza los efectos directos sobre el organismo en razón de sus características físicas y químicas.

#### Indicaciones y Técnicas crenoterápicas (E. Romero Velasco)

El autor expone aquellos aspectos médicos no contemplados en la ponencia anterior, incluyendo un apartado sobre técnicas de administración de aguas Minero-Medicinales tanto en las curas hidropínicas (agua de bebida) como en las técnicas de balneoterapia general y local.

#### Protección y Control. Aplicaciones atmiátricas (Denise Pepin)

La calidad de los tratamientos de crenoterapia se aprecia mediante cierto número de características entre las cuales la eficacia y la inocuidad son las más importantes.

En gran parte, la inocuidad depende de las precauciones de higiene que se toman en los tratamientos por lo que la ponente analiza los problemas y las particularidades de la higiene en los balnearios.

#### Piscinas de tratamiento: Higiene y control (J. San Martín Bacaicoa)

La aplicación tópica de las aguas minero-medicinales en forma de baños es quizá la técnica más frecuente y eficaz para cierto tipo de enfermos (reumáticos, traumatismos, etc.). Sin detenerse en destacar los aspectos médicos de esta técnica, la ponente analiza los problemas que desde el punto de vista sanitario y legislativo surgen de la utilización de las piscinas de tratamiento. Ante esta problemática se dedica una gran parte de su exposición a «Medidas de Prevención».

#### Necesidad de conservación de nuestro patrimonio balneario (J. Sánchez Ferre)

El autor resume en su ponencia un trabajo iniciado anteriormente para el cual ha visitado unos 300 balnearios con el fin de conocer su situación, obtener información sobre su arquitectura e historia, comprobar el estado de sus instalaciones, etc.

Por lo tanto pretende ofrecer una nueva perspectiva para el análisis de los balnearios al incorporar la arqueología, la historia urbana y la arquitectura.

#### Arquitectura Termal, Poética y Práctica (José I. Vázquez-Illa Navarro)

Siguiendo con el apartado de arquitectura balnearia el autor analiza la evolución histórica de este tipo de edificaciones concluyendo con unas ideas prácticas que deberá tener en cuenta el arquitecto que diseñe un establecimiento de este tipo.

#### Análisis y coordinación entre la Ley de Minas y la Reglamentación Técnico-Sanitaria sobre aguas de bebida envasadas (Juana Baeza Rodríguez-Caro)

La autora refleja el marco legal que regula la actividad desde el punto de vista del sector minero y describe las normas de procedimiento para las declaraciones, analiza las leyes vigentes para tratar de armonizarlas con la reglamentación técnico-sanitaria sobre aguas de bebida envasadas y concluye con un análisis de la problemática que crea esta armonización planteando soluciones legales para las mismas.

#### Los sectores de aguas envasadas y de los balnearios en España. Una aproximación económica (J. Antonio Maroto Acín)

En esta ponencia el autor analiza desde el punto de vista económico la producción, demanda, evolución en los últimos años, así como perspectivas de futuro del sector de aguas de bebida envasadas y de balnearios.

#### Marketing Externo e Interno de un balneario (Javier Vázquez-Illa Navarro)

Contempla esta exposición el conjunto de políticas o herramientas técnicas para llevar a cabo los objetivos de una empresa tan específica y compleja como es la explotación de un balneario.

#### Aspectos socioeconómicos de las aguas de bebidas envasadas (Jesús S. Pérez Díaz)

El autor expone los tipos de aguas envasadas existentes en Europa y Estados Unidos, indicando alguno de los requisitos exigidos para su comercialización y planteando las dificultades que presentan estas exigencias cuando las aguas quieren ser exportadas.

Concluye su exposición con la evolución de producción de las aguas en la CEE a nivel global y por países.

#### Turismo de Salud (M.<sup>a</sup> Luz Rufilanchas Serrano)

Se aborda en esta ponencia este tipo de turismo y especifica las competencias en esta materia que se encuentran repartidas entre la Administración Central y Autonómica, especificando no sólo las competencias sino las ayudas que puede recibir por parte de la administración este sector.

# NORMAS DE PUBLICACION PARA LOS AUTORES

Los trabajos inéditos que se reciban para su publicación en el BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO serán revisados por un Comité editorial que decidirá si procede su publicación.

Los autores deberán atenerse a las siguientes normas:

## Texto.

Se entregará paginado y mecanografiado a doble espacio por una sola cara y con amplios márgenes. Este texto se considerará definitivo, deberá venir leído por el autor y perfectamente puntuado y con las correcciones de las erratas de mecanografía que fuesen precisas. En él serán marcadas las fechas de recepción y aceptación.

Cuando en el trabajo se acompañen figuras, tablas y fotografías, el autor deberá dejar un pequeño espacio con indicación del lugar donde han de intercalarse, si es posible. En los originales de las mismas se reseñará el título del trabajo, así como el nombre de los autores.

Todos los trabajos en lengua española irán precedidos de un breve resumen en español e inglés o francés. Los de idiomas extranjeros lo llevarán en su idioma y también en español. Al final de los mismos, y en párrafo aparte, se incluirán las palabras clave, reservándose el último lugar para la localización geográfica, si la hubiere.

En todo momento los autores conservarán una copia del texto original y figuras.

## Idiomas.

Excepcionalmente podrán publicarse trabajos en otros idiomas (preferiblemente inglés o francés), siempre que abarquen temas sobre España y sean de autores extranjeros.

## Referencias.

Se incluirá al final de cada trabajo la relación de las obras consultadas por orden alfabético de autores, empleándose las normas y abreviaturas usuales.

## Parte gráfica.

La parte gráfica vendrá preparada para ser reproducida a las anchuras máximas de 80 mm. (una columna) y 170 mm. (doble columna). Se evitará en lo posible la inclusión de encartes, así como se reducirá a lo indispensable el número de figuras, tablas y fotografías. En las ilustraciones a escala, ésta se expresará solamente en forma gráfica, con objeto de evitar errores en caso de reducir el original. Todas las figuras irán numeradas correlativamente según su orden de inserción.

Las figuras serán originales y nunca copiativos, delineadas con tinta china sobre papel vegetal. Las tablas, bien presentadas para su reproducción fotográfica. Las fotografías serán positivos en blanco y negro sobre papel brillo y excepcionalmente en color (positivo en brillo o transparencia).

## Pruebas.

Serán enviadas a los autores para que realicen las correcciones de erratas de imprenta producidas en la composición, no admitiéndose modificación alguna, adición o supresión al texto original.

Las pruebas serán devueltas por el autor en el plazo máximo de diez días, pasados los cuales la Redacción decidirá entre retrasar el trabajo o realizar ella misma la corrección, declinando la responsabilidad por los errores que pudieran persistir.

Los originales de texto y figuras quedarán en poder de la Redacción.

## Tiradas aparte.

Se asignan 30 tiradas aparte con carácter gratuito por trabajo publicado. Cuando el autor desee un número mayor del indicado deberá hacerlo constar por escrito en las pruebas y abonar el precio de este excedente.

La Redacción del BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO introducirá cuantas modificaciones sean necesarias para mantener los criterios de uniformidad y calidad del mismo. De estas modificaciones se informará al autor.

Toda la correspondencia referente a las publicaciones  
deberá dirigirse a:

Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara  
Instituto Tecnológico Geominero de España  
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

## TARJETA DE SUSCRIPCION AL BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

### Boletín Geológico y Minero

Revista bimestral de geología, minería  
y ciencias conexas

Precio suscripción anual (6 números). Año 1994:  
6.000 ptas. Igual precio para años anteriores.

### DIRECCION Y ADMINISTRACION

Instituto Tecnológico Geominero de España

Ríos Rosas, 23 - 28003-Madrid, España

Telef./Fax (91) 349 57 62

Nombre .....

Organismo o Empresa .....

Dirección ..... Teléfono .....

Ciudad ..... C. P. ....

País ..... FIRMA

Fecha .....

## BOLETIN GEOLOGICO Y MINERO

### ACUSE DE RECIBO

HEMOS RECIBIDO  
WE HAVE RECEIVED  
NOUS AVONS RECU

NOS FALTA  
WE ARE IN WANT OF  
IL NOUS MANQUE

FECHA ..... FIRMA  
DATE ..... SIGNATURE .....

NOMBRE .....  
NAME .....  
NOM .....

DIRECCION .....  
ADDRESS .....  
ADRESSE .....

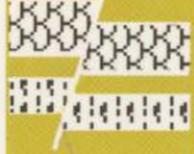
ROGAMOS DEVUELVAN ESTE ACUSE DE RECIBO, NECESARIO PARA NUESTRO CONTROL, DIRIGIDO EXCLUSIVAMENTE A AQUELLOS CENTROS QUE RECIBEN ESTA PUBLICACION CON CARACTER GRATUITO EN REGIMEN DE INTERCAMBIO.

# Instituto Tecnológico GeoMinero de España

## Finalidad:

*Investigación, Desarrollo Tecnológico y Asistencia técnica en Geología, Minería y Disciplinas conexas*

### GEOLOGIA Y GEOFISICA



MAPA GEOLOGICO NACIONAL (MAGNA)  
ESTUDIOS GEOLOGICOS Y CARTOGRAFIA TEMATICA  
GEOFISICA Y GEOLOGIA DEL SUBSUELO  
GEOLOGIA MARINA (FONDOS MARINOS)  
TELEDETECCION APLICADA

### RECURSOS MINERALES



METALOGENIA Y CARTOGRAFIA METALOGENETICA  
GEOQUIMICA BASICA Y APLICADA  
YACIMIENTOS MINERALES  
EVALUACION DE RESERVAS E INVENTARIO DE RECURSOS

### AGUAS SUBTERRANEAS



CARTOGRAFIA HIDROGEOLOGICA  
PROTECCION DE RECURSOS HIDROGEOLOGICOS  
EVALUACION Y CONTROL DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS  
RECURSOS GEOTERMICOS

### LABORATORIOS Y ENSAYOS



ANALISIS QUIMICOS Y MINERALOGICOS  
ENSAYOS MINERALURGICOS Y GEOTECNICOS  
CARACTERIZACION DE ROCAS MINERALES INDUSTRIALES  
SONDEOS DE INVESTIGACION HIDROGEOLOGICA Y MINERA  
ENSAYOS DE BOMBEO

### INFORMACION, DOCUMENTACION Y BANCO DE DATOS



FONDOS DOCUMENTALES Y BASES DE DATOS  
SISTEMAS DE INFORMACION Y COMUNICACIONES  
CATASTRO MINERO  
PUBLICACIONES

### INGENIERIA GEOAMBIENTAL



RIESGOS GEOLOGICOS  
RESTAURACION DEL MEDIO AMBIENTE MINERO  
GEOTECNIA Y GEOLOGIA APLICADA A LA INGENIERIA  
MEDIO AMBIENTE Y ORDENACION DEL TERRITORIO

### DESARROLLO MINERO



PROCESOS Y TECNOLOGIAS  
SEGURIDAD MINERA  
NORMATIVA  
ESTUDIOS DE ECONOMIA MINERA

### MUSEO GEOMINERO

#### Sede Central:

c/ Ríos Rosas, 23. 28003 MADRID  
Tel.: 441 65 00 – Fax: 442 62 16

#### Centro de Laboratorios:

c/ La Calera, 1 28760 TRES CANTOS (MADRID)  
Tel.: 803 22 00



Instituto Tecnológico  
GeoMinero de España

MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO  
SECRETARIA GENERAL DE LA ENERGIA Y RECURSOS MINERALES

