



Instituto Tecnológico
GeoMinero de España

boletín

geológico

y minero

VOLUMEN 104

Marzo - Abril 1993

NUMERO 2



Volumen 104

Número 2

Marzo - Abril 1993

boletín *Parte II* geológico y minero



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

Sumario

Geología	D. GOMEZ-GRAS: El Permotrias de la Cordillera Costero Catalana: Facies y Petrología Sedimentaria (Parte I)	3
Aguas subterráneas	A. NAVARRO ALVARGONZALEZ: Miniprogramas (V). Modelos hidroquímicos y/o de transporte de masas	50
Geofísica	J. L. GARCIA LOBON y A. GRANDA: Reprocesado e interpretación de varias campañas de geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico ...	65
Geoquímica	M. VIDAL BARDAN: Mineralogía de los óxidos de hierro de los suelos rojos de la cuenca del Ebro	80
Información	J. A. JIMENEZ SALAS: El método científico y la Geotecnia	93
	F. J. AYALA CARCEDO: Bicentenario de Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), eminente ingeniero de minas-geólogo	99
	L. M. RIOS, J. M. CHARLET, J. M. GALERA, D. BARETTINO y F. BODEGA: Memoria sobre la organización, desarrollo y trabajos realizados en el XXXVIII Campamento para Prácticas de Geología «Pirineo Central 1992».	108

DIRECCION, REDACCION Y PUBLICACION

Ríos Rosas, n.º 23 - 28003-Madrid

Teléfono 441 70 67

ADMINISTRACION, DISTRIBUCION Y SUSCRIPCION

Doctor Fleming, 7, 2.º - 28036-Madrid

Teléfono 250 02 03

**INSTITUTO TECNOLÓGICO
GEOMINERO DE ESPAÑA**

**CENTRO DE PUBLICACIONES
MINISTERIO DE INDUSTRIA, COMERCIO Y TURISMO**

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

Intrusión filoniana compleja de granitos y pegmatitas en el Conjunto Plutónico de Vivero (Playa de Esteiro, Vivero, Lugo).

Autor: Félix Bellido Mulas

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

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

El Permotrias de la Cordillera Costero Catalana: Facies y Petrología Sedimentaria (Parte I).

Por D. GOMEZ-GRAS (*)

RESUMEN

Se estudia en este trabajo las Facies y Petrología Sedimentaria del Permotrias de la Cordillera Costero Catalana y se comienza haciendo una explicación de los objetivos planteados y de la metodología seguida para su resolución, así como también se realiza una enumeración de las diferentes incógnitas que se plantean al comenzar un estudio de estas características desde el punto de vista de la Litoestratigrafía y Geología de Facies, de la Estratigrafía Secuencial y de la Petrología Sedimentaria.

A continuación se realiza la descripción de las diferentes zonas en las que se ha dividido el área de estudio comenzando por los afloramientos permotriásicos más septentrionales de la Cordillera Costero Catalana (sectores de Montseny y de Garraf) y finalizando en los más meridionales (sectores de Miramar y de Prades-Colldejou).

El orden seguido en la explicación de cada una de las zonas es similar y consta de una descripción de las facies y del medio sedimentario en el que se depositaron estos materiales, de sus características petrológicas, de su área de procedencia, de la diagénesis que han sufrido, finalizando con la realización de un modelo que ilustra la relación tectónica-sedimentación en cada una de las cuencas de tipo semigraben que se han individualizado.

Palabras clave: Facies, Petrología Sedimentaria, Permotrias, Cordillera Costero Catalana.

ABSTRACT

The main purpose of this paper is the analysis of the Facies and Sedimentary Petrology of the Permotriassic sediments outcropping in the Catalan Coastal Ranges.

The work begins with the exposition of the methodology and the objectives. After that, numerous questions about Litostratigraphy, Facies Geology and also Sequential Stratigraphy and Sedimentary Petrology are presented.

The studied area has been divided into four zones for easy description: two northern zones, the Montseny and Garraf areas and two southern zones, the Miramar and Prades-Colldejou areas.

The method used to study the characteristics of each zone is similar. It consists in a description of the facies and sedimentary environment, its petrologic features, provenance area and the diagenetic processes that took place. Each description ends by a tectonic-sedimentary model applied to each half-graben basin.

Key words: Facies, Sedimentary Petrology, Permotriassic, Catalan Coastal Ranges.

(*) Universitat Autònoma de Barcelona, Facultat de Ciències, Departament de Geologia, 08193 Bellaterra.

Este trabajo corresponde a parte de la memoria de la Tesis Doctoral, defendida en mayo de 1992 por el que suscribe y dirigida por los profesores Joan Rosell Sanuy y Rafaela Marfil Pérez. Dicha memoria titulada: «El Permotrias de las Baleares, de la Cordillera Costero Catalana y de la vertiente mediterránea de la Cordillera Ibérica: Facies y Petrología Sedimentaria», ha quedado dividida en dos partes a efectos de su publicación. La primera parte se circunscribe geográficamente al Permotrias de la Cordillera Costero Catalana. La segunda parte, que aparecerá publicada en el siguiente número del Boletín, corresponde al Permotrias de las Baleares, del Maestrat y de la Cordillera Ibérica e incluye los capítulos de síntesis y conclusiones generales para toda el área de estudio.

1. INTRODUCCION

«Estratigrafía física y Petrología Sedimentaria del Pérmico y Buntsandstein de la isla de Menorca» es el título de la tesis de licenciatura del autor de estas líneas que fue defendida en 1987. La insularidad hace que los resultados obtenidos tengan un restringido carácter regional. No por ello, el tema de estudio pierde su interés más estricto teniendo en cuenta, a mayor abundamiento, que la petrología de esta serie de sedimentos terrígenos rojos que marca el final del Paleozoico e inicio del Mesozoico en esta parte del Mediterráneo occidental es poco conocida. El tema de la tesina, ampliado geográficamente al resto del archipiélago balear, y a los afloramientos más litorales de la Península en el Mediterráneo, fue el objetivo principal que se pretendía alcanzar al plantear la tesis.

En el archipiélago balear, aparte de Menorca, estos sedimentos terrígenos rojos afloran también en Mallorca. RAMOS et al. (1985) con motivo de la realización del Mapa Geológico Nacional 1/50.000 (Cartografía MAGNA) fue quien por vez primera, con una finalidad sedimentológica, ha levantado series estratigráficas en los parques y acantilados afloramientos que existen en esta isla. Establece los principales rasgos sedimentológicos de estos materiales, encaminados a la descripción de sus facies y medios sedimentarios; estudios que más tarde otros autores han ido perfeccionando. No obstante, la petrología de los mismos y sobre todo, la relación entre las facies y las características petrológicas constituye un conjunto de temas de estudio que aún no han sido abordados.

Para completar regionalmente el objetivo principal, meta de esta investigación y una vez establecidas las directrices principales de estudio del Permotriás balear, faltaba conocer cuál era su relación con el Permotriás peninsular y concretamente con los afloramientos existentes más cercanos al litoral mediterráneo: los Catalánides o Cordillera Costero Catalana y la Cordillera Ibérica (fig. 1).

La Cordillera Costero Catalana alineada según la costa, es decir de NE a SO, presenta afloramientos de estas facies y edad que fueron estudiados por LLOPIS (1947), VIRGILI (1958) y MARZO (1980). En síntesis, estos trabajos sentaron las bases estratigráficas y en el último

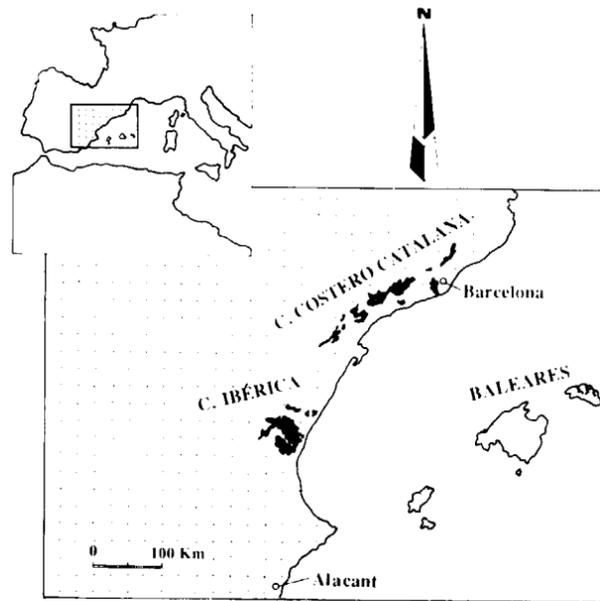


Figura 1.—Esquema de situación de los afloramientos permotriásicos del extremo oriental de la Península Ibérica y de las Islas Baleares.

de ellos, además, la descripción e interpretación de las facies que estos materiales presentan. La caracterización petrológica del sedimento, su diagénesis y su procedencia son facetas de estudio aún no abordadas en esta unidad morfoestructural.

Los afloramientos más distales de materiales permotriásicos pertenecientes al aulacógeno ibérico se sitúan al N en las inmediaciones del Desert de Les Palmes y al S en la sierra d'Espadà, y su prolongación hacia Sagunt. Los estudios de DUPUY DE LOME (1959), FONOLLA (1972), GOY et al. (1973), OBIS y CANEROT (1972), LOPEZ-GOMEZ y ARCHE (1988 y 1989) y DIAZ (1983) en el sector sierra d'Espadà-Sagunt, y de MARZO (1983) en el Desert de les Palmes, describen las características litoestratigráficas generales de estos afloramientos. En alguno de ellos, y en base a sus facies existen interpretaciones acerca de los medios sedimentarios en los cuales se depositaron. Un análisis de su petrología y la interpretación de los datos que ésta puede proporcionar son líneas de investigación hasta el momento olvidadas.

Así pues, el tema de estudio que a continuación

se va a desarrollar intentará paliar el vacío existente en el conocimiento de las series rojas de transición entre las eras Primaria y Secundaria, en este sector del Mediterráneo Occidental, sobre todo en lo que respecta a su caracterización petrológica. Es decir: petrografía, procedencia y diagénesis.

El área de estudio abarca las islas Baleares y una estrecha franja del litoral mediterráneo, desde los Pirineos hasta Valencia. En conjunto, constituyen la parte más occidental del Mediterráneo.

Los afloramientos, por razones geográficas y hasta cierto punto por la unidad tectosedimentaria a la que pertenecen, se han agrupado en cinco zonas, que son: la Cordillera Costero Catalana (unidad tectosedimentaria), Menorca (unidad geográfica), que junto a Mallorca cubre los afloramientos permotriásicos de las Baleares, el Maestrat y la Cordillera Ibérica

2. GENERALIDADES

2.1. INTRODUCCION

Las capas rojas en las que se sitúa el límite entre el Pérmico (Paleozoico) y el Esquitiense (Triásico Inferior) constituye la unidad inferior del Triás de facies germánica. Cuando estas capas rojas abarcan en edad tan sólo la parte inferior de la serie triásica se le denomina (de facies) Buntsandstein («arenisca abigarrada»), nombre con el que clásicamente es conocida esta parte de la serie en Alemania central. Cuando, además, abarca las postrimerías de la Era Primaria se le acostumbra a denominar Permotriás (nombre que viene utilizándose en la geología pirenaica). La dificultad que estos sedimentos presentan para establecer una cronoestratigrafía correcta imposibilita, en algunas ocasiones, diferenciar entre Pérmico y Triásico lo cual, en el fondo, se realiza más por hábito que como consecuencia de un estricto rigor científico.

2.2. EL PERMOTRIAS EN LA PENINSULA IBERICA

Al final del Carbonífero y comienzos del Pérmico,

la Placa Ibérica formaba parte de la zona de megacizalla que afectaba a la Cordillera Hercínica. Esta zona se hallaba limitada por dos sistemas de fallas transformantes, uno al N denominado «zona de fractura del Golfo de Vizcaya» y otro al S, que constituía la «zona de fractura de Gibraltar» (fig. 2).

Como consecuencia del movimiento de estas fallas a lo largo de la zona de megacizalla, de desarrolló en el interior de la Placa Ibérica un importante sistema conjugado de cizallas menores con direcciones NO-SE y NE-SO. Estos sistemas de fallas favorecieron el desarrollo de cuencas transtensionales subsidentes, con una geometría típica de semigraben, en las que se acumularon un gran espesor de sedimentos continentales y de rocas volcánicas (fig. 3A).

Durante el Pérmico Superior y el Triásico Inferior tuvo lugar una reactivación tensional de la zona de fractura permo-carbonífera del Golfo de Vizcaya. Como consecuencia de ello se originó una tectónica extensional y los sistemas de cizallas menores actuaron, al reactivarse, como fallas normales, dando lugar a cuencas de tipo rift. De esta manera se originaron al N de la Placa Ibérica la cuenca Cántabro-Pirenaica, al NE la cuenca Catalánide y, atravesándola, la cuenca o surco Ibérico. En estos surcos la sedimentación se realiza en forma de capas rojas (*red beds*), que, con el tiempo y esporádicamente, pasan a materiales marino-someros.

En un sentido general puede afirmarse que la parte occidental y noroccidental de la Península Ibérica (Meseta s.l.), durante este período, corresponde a un área de erosión, mientras que en su parte oriental se acumulaban los sedimentos procedentes de la erosión (fig. 4). Asimismo, en el área de sedimentación pueden distinguirse umbrales y surcos. En los umbrales dominaba por lo general la erosión o no sedimentación, mientras que en los surcos, localmente, podían acumularse espesores considerables de materiales (fig. 5).

El relleno de las cuencas sedimentarias, por lo menos durante el Carbonífero Superior y Pérmico, probablemente estuvo condicionado por los cambios eustáticos del nivel del mar (fig. 3B). Las glaciaciones de Gondwana, con gran probabilidad, fueron la causa de estos cambios eustáticos. Dichas glaciaciones tuvieron una máxi-

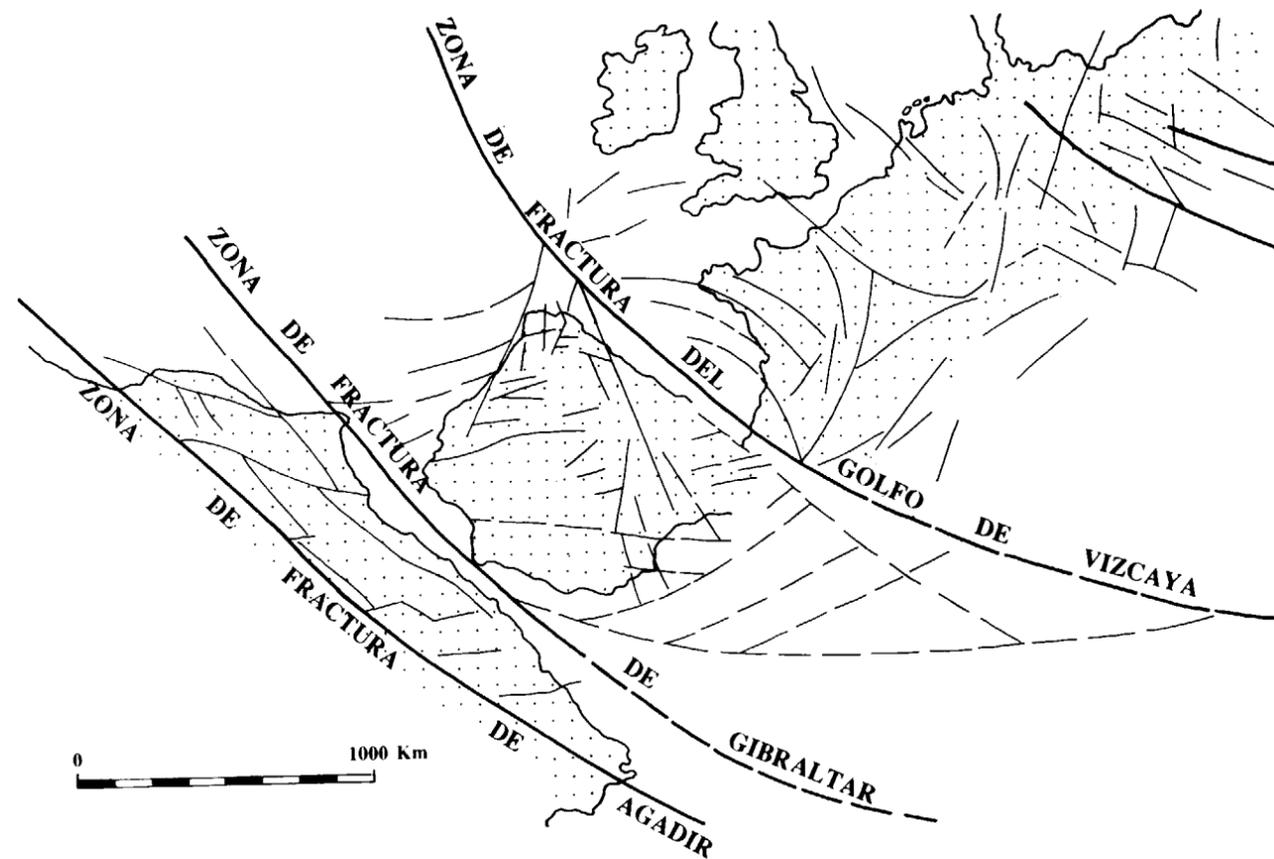


Figura 2.—Esquema de situación de los principales accidentes tectónicos que limitaban la Placa Ibérica durante el Permo-Carbonífero (Estefaniense-Autuniense) (modificado de ZIEGLER, 1988).

ma intensidad durante el Carbonífero final y principios del Pérmico, atenuándose rápidamente al comienzo del Pérmico Superior. Así pues, la acentuada ciclicidad que presentan las series del Pérmico Superior puede ser consecuencia de estas continuadas fluctuaciones glacio-eustáticas del nivel del mar. A pesar de ello, SCHOPF (1974) y FORNEY (1975) explican estos movimientos eustáticos como la respuesta a variaciones de la expansión del océano por cambios del volumen de las dorsales.

En función del momento tectono-eustático se produjeron, durante el Triásico, varias transgresiones del Tethys de la parte oriental a la occidental. Estos ascensos del nivel del mar son muy manifiestos cuando la sedimentación es de tipo carbonatado y son de difícil caracterización en los materiales terrígenos de coloración monó-

tonamente rojiza, ya que clásicamente y como hábito, se asocia el color rojo a sedimentos continentales.

Tanto el momento tectónico regional condicionante de la distribución y morfología de las áreas de sedimentación como los movimientos eustáticos globales en función de los cuales se realiza predominantemente el relleno de las mismas, son los causantes de que en la Península Ibérica puedan individualizarse tres áreas en las que la historia de las cuencas *rifts* permotriásicas es conocida. Estas son: Pirineos-Cordillera Cantábrica, Cordillera Costero Catalana y Cordillera Ibérica.

Durante estos últimos años se han dedicado esfuerzos de estudio considerables a la Estratigrafía y en general a las facies de estas series rojas

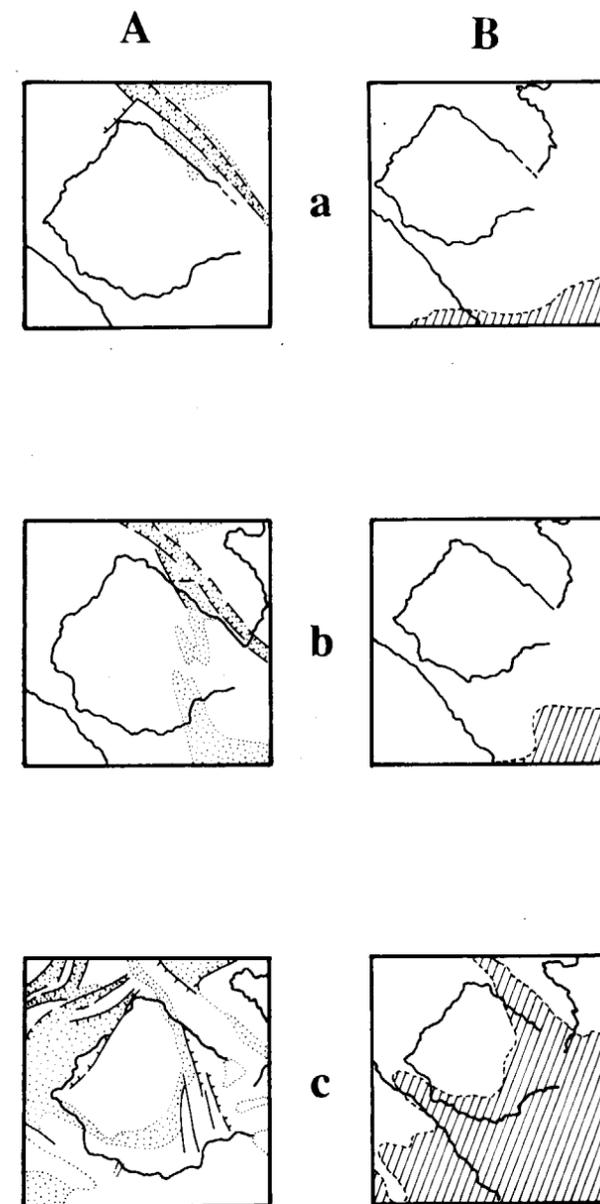


Figura 3.—A) Evolución de la cuenca sedimentaria de la Península Ibérica y B) esquema evolutivo de la posición del límite continente/mar durante el a) Pérmico Inferior, b) Pérmico Superior y c) Triásico Medio (modificado de ZIEGLER, 1988).

permotriásicas. Así, salvo raras pero importantes excepciones, entre las que hay que destacar la influencia del ITGE con el plan MAGNA, cada una de estas cuencas pertenece al área de acción de una Universidad: la Cordillera Cantábrica a la Universidad del País Vasco, el Pirineo,

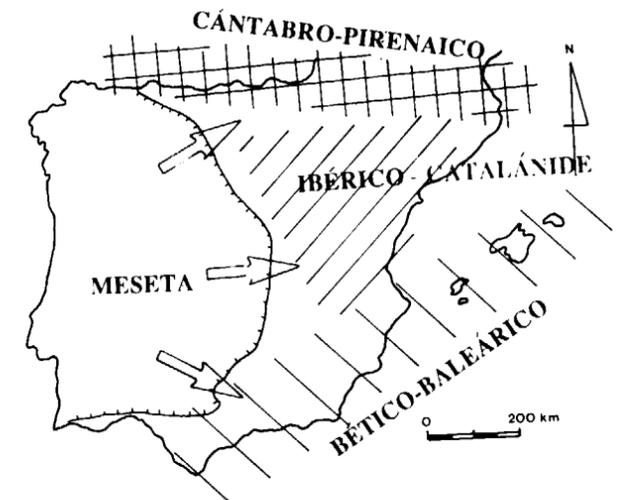


Figura 4.—Áreas de erosión (Meseta) y dominios de sedimentación en la Península Ibérica durante el Permotriás.

aparte de las escuelas holandesas, a la Universidad de Zaragoza y a las Universidades Autónoma y Central de Barcelona, la Cordillera Costero Catalana a las Universidades Autónoma y Central de Barcelona y la Cordillera Ibérica a la Universidad Complutense de Madrid.

El estudio de estas cuencas permotriásicas adolece de la falta de trabajos de síntesis, tanto de cada una por separado como de su conjunto. Hay que exceptuar el estudio de SOPEÑA et al (1988), de consulta obligada para adquirir una rápida visión de conjunto del Permotriás peninsular.

La dificultad que presenta la realización de síntesis de la evolución de estas cuencas deriva de la poca fiabilidad de las escasas dataciones que actualmente existen de estas series. Este problema repercute de forma primordial en el establecimiento de correlaciones. Problema difícil de resolver por criterios geométricos y litológicos debido a que las series son mayoritariamente de origen fluvio-deltaico. En estos medios sedimentarios, las variaciones laterales son muy rápidas, siendo muy raros los niveles que por su continuidad areal permiten una correlación intracuenal y son prácticamente inexistentes aquellos horizontes de correlación entre cuencas diferentes.

Una división de la serie en función de «rupturas sedimentarias» *sensu* GARRIDO y VILLENA

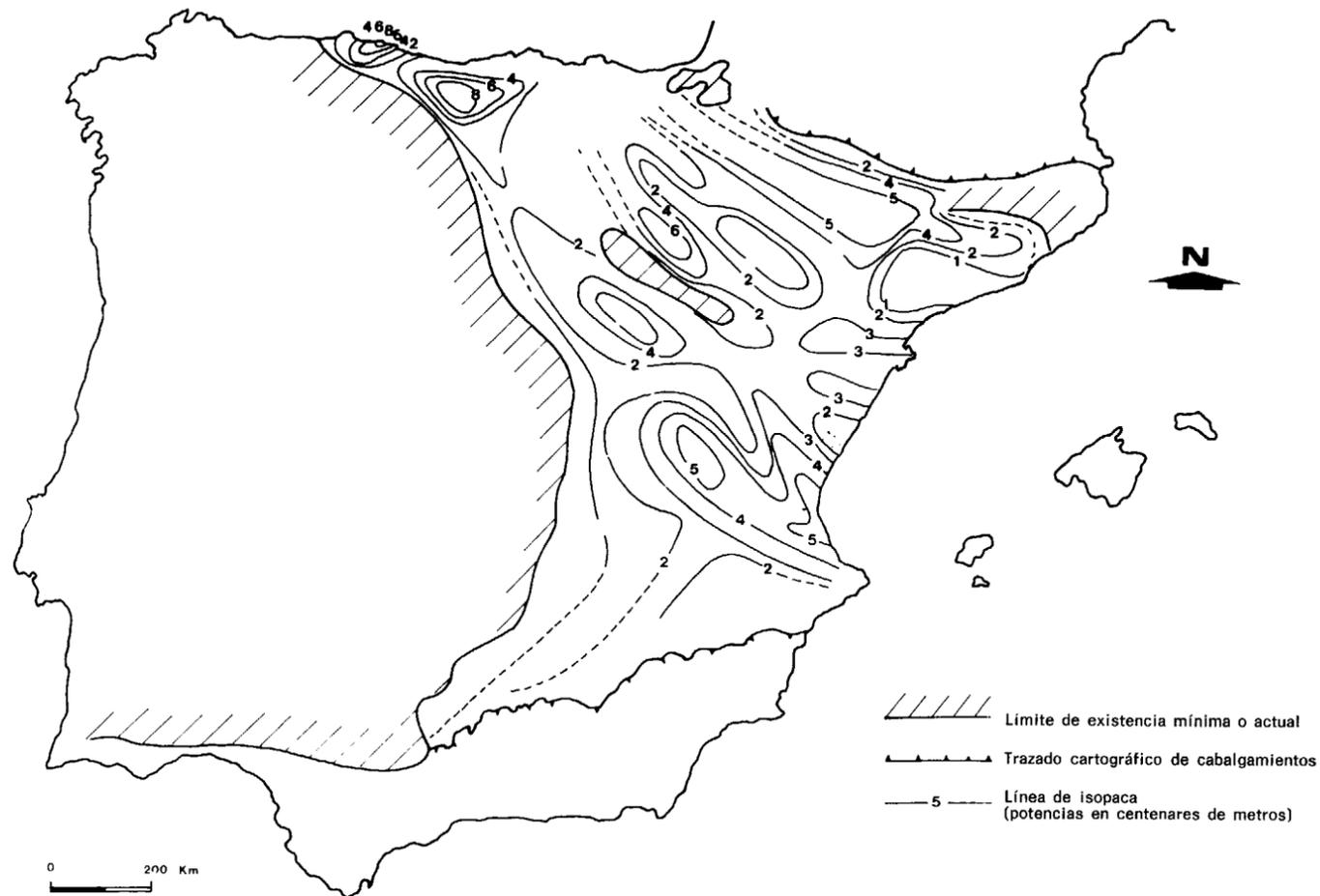


Figura 5.—Mapa de isopacas del Pérmico Superior y Triásico Inferior con los principales umbrales y surcos según GARRIDO y VILLENA (1977).

(1977) o en «secuencia deposicionales» podría quizá ayudar a resolver este problema. Por el contrario, la influencia que los movimientos eustáticos ejercen en la velocidad y tipo de relleno de estas cuencas de la Península Ibérica es totalmente desconocida.

No obstante, en la Península Ibérica, la historia tectónica de estas cuencas durante el Pérmico y el Triásico ha transcurrido, en base principalmente a los datos bibliográficos, por las siguientes etapas:

a) Una etapa compresiva, relacionada con los últimos movimientos hercínicos, que alcanzó hasta el Pérmico Inferior (Autuniense),

causante de la formación de las primeras cuencas sedimentarias de tipo transtensional, con una geometría típica de semigraben. La serie depositada tanto en la cuenca Cántabro-Pirenaica, como en la Cordillera Ibérica tiene características vulcano-sedimentarias siendo los ambientes de abanicos aluviales y los lacustres los más ampliamente representados.

b) Una etapa de transición, que comporta el cambio de un régimen compresivo a uno distensivo, durante la cual se depositaron las facies saxonienses y en la que tuvo lugar un vulcanismo asociado de basaltos alcalinos.

Son las típicas facies de color rojo asociadas a abanicos aluviales distales y que se encuentran bien representadas en Pirineos, Cordillera Ibérica y Baleares. En la Cordillera Costero Catalana no se han descrito sedimentos pertenecientes a alguna de estas dos etapas.

c) Y, finalmente, una etapa distensiva que comprende desde el Pérmico Superior hasta el Jurásico Inferior en la que se depositaron las facies Buntsandstein, Muschelkalk y Keuper del Triásico y las series carbonatadas jurásicas. De todas estas facies es el Muschelkalk el que posee mayor variación areal, presentando dos barras carbonatadas tanto en la Cordillera Costero Catalana como en el extremo oriental de la Cordillera Ibérica, incluyendo probablemente Menorca, y una sola barra en el resto de los afloramientos peninsulares.

* * *

Así pues, concluyendo, el esfuerzo que algunas escuelas han realizado en el estudio de las series rojas permotriásicas de la Península Ibérica ha cristalizado en multitud de trabajos que, por un lado, han dado lugar a un cierto grado de conocimiento de estos sedimentos y, por otro, han hecho surgir una inagotable fuente de problemas. Cada estudio realizado ha resuelto alguno de ellos, pero en su mayoría han planteado, a su vez, nuevas problemáticas.

2.2.1. Problemática planteada

Si se intentan analizar las cuencas permotriásicas de la Península Ibérica, aunando y sintetizando la gran cantidad de datos bibliográficos que sobre ellas se han publicado, se plantean problemas que, en su mayoría, derivan de la dificultad que representa comparar los datos de diferentes trabajos cuyos autores pertenecen a distintas escuelas.

A pesar de ello, en un intento de sintetizar el análisis de estos datos bibliográficos, los problemas principales que se desprenden pueden agruparse en distintas categorías: los paleogeográficos, incluyendo en ellos los de localización y tipos de áreas fuente de los sedimentos

consecuencia del momento tectónico, los de medios sedimentarios, los paleoclimáticos, los bio y cronoestratigráficos y los derivados de la influencia del eustatismo en la sedimentación permotriásica.

I. Paleogeográficos

Existen una gran cantidad de incógnitas en el proceso tectónico que condicionan la evolución de la cuenca sedimentaria. ¿A qué modelo puede asimilarse? ¿Cuál es su geometría y cuál es el mecanismo de su deformación, la historia de su relleno y la evolución del momento tectónico en relación a la sedimentación? ¿Cuál es la relación entre estas cuencas emparentadas genéticamente, pero diferentes geoméricamente? ¿El Permotriás peninsular se ha depositado en una o varias cuencas, con una o varias áreas fuente o es una sola cuenca compartimentada en umbrales y surcos? Si así fuera, ¿cuántos surcos existían y cuál es el papel de los umbrales en el reciclado del material que rellena éstos? ¿Estos umbrales son heredados del Pérmico o bien los materiales de esta edad, probablemente producto de reciclados anteriores van a ser re-sedimentados en los surcos? ¿Coincidiría este hecho con las áreas de máxima acumulación? ¿Las series prebéticas son en realidad marginales del dominio ibérico en una misma cuenca o bien pertenecen a una cuenca distinta? ¿Los Pirineos, los Catalánides y la Ibérica, formaron parte de una única área de sedimentación cuyo enlace se realizaba por la actual Depresión del Ebro? Si, como parece, los sedimentos del Cretácico pirenaico proceden de la erosión del Macizo del Ebro, ¿cuál era la verdadera extensión del Permotriás, hoy reciclado en gran parte de su volumetría, en las cuencas cretácicas del Pirineo?

II. Area fuente

Los datos que poseemos sobre la naturaleza de los sedimentos que forman el relleno de las cuencas permotriásicas son escasos, debido a que los estudios petrológicos de estas cuencas son limitados, parciales y localizados en el área de influencia de la Universidad de Madrid (fig. 6). Por ello, el planteamiento de problemas acerca

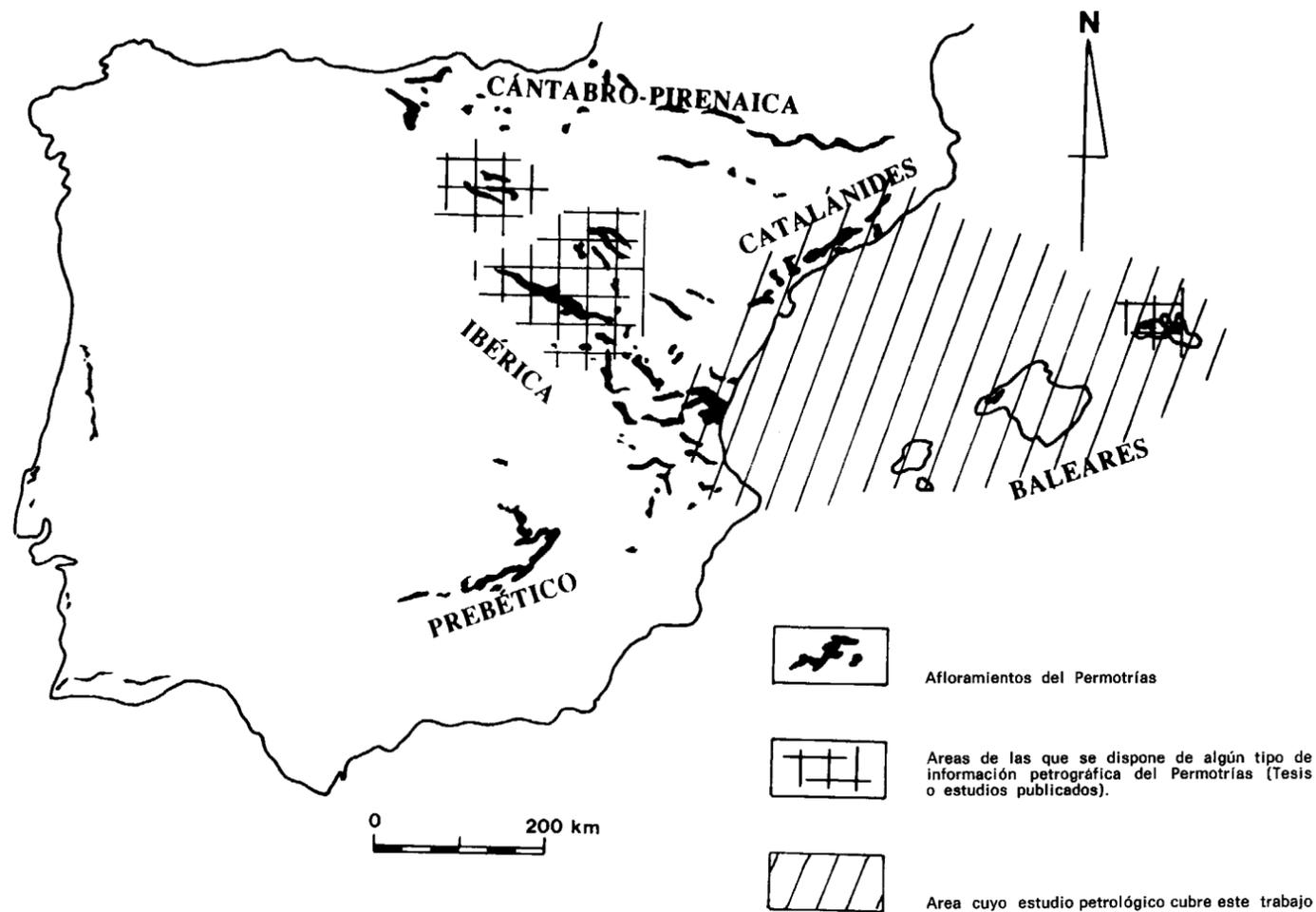


Figura 6.—Situación de las zonas con estudios petrológicos.

del conocimiento del área fuente sería interminable. Algunos, los más generales, se desprenden de imaginar el enorme volumen de sedimentos, generalmente bien clasificados y composicionalmente maduros, disponibles en la Península para, en relativamente poco tiempo, rellenar los surcos permotriásicos. ¿Cuándo y dónde se ha originado el material terrígeno de la cuenca permotriásica? ¿Los procesos erosivos «primarios» que dieron lugar al sedimento permotriásico se produjeron al mismo tiempo que el relleno de las cuencas o bien procedían de etapas erosivas anteriores? Si el área madre era metamórfica, ¿qué volumen de materiales (Km³) se han erosionado para dar lugar a estos sedimentos? ¿Cuánto duró y en qué momento se produjo esta etapa erosiva? ¿Se trata de materiales de primer ciclo de sedimentación o por

el contrario el área madre estaba compuesta por sedimentos ya transportados y clasificados y potencialmente disponibles para su retrabajamiento? ¿Ayudaría a esclarecer algunas de estas incógnitas el establecimiento, si esto fuera posible, de diferentes áreas de procedencia bien delimitadas y caracterizadas para el Permotriás de la Península? ¿Cuántas pueden distinguirse? ¿Dónde se hallarían situadas? ¿Qué características definen cada una de ellas? ¿Cuáles son las direcciones de los aportes, en general, de todas las cuencas, y en particular en el Pirineo? (aquí las paleocorrientes presentan una marcada procedencia del S, donde se sitúa la Depresión del Ebro, y, según JURADO (1989), la serie permotriásica constituye el basamento del Terciario que rellena dicha depresión).

III. Medio sedimentario

Volviendo al primero de estos apartados cabe preguntarse ¿cómo tenía que ser la paleogeografía post-carbonífera para que la sedimentación se realizara fundamentalmente en medios de abanicos aluviales? ¿Cómo funcionaban para clasificar el detrito de manera que se produjeran potencias enormes de materiales terrígenos con granulometrías tan constantes? ¿Cuándo y cómo se «rodó» el cuarzo, puesto que al parecer el transporte es corto y su sedimentación muy rápida? ¿Cómo actuaba la subsidencia, a qué escala es observable y cuál es su relación con los fenómenos de avulsión?

Si el medio de sedimentación es fluvial, ¿dónde se encuentran situadas las desembocaduras de los ríos, es decir, dónde iba a parar el material transportado por los canales, que a juzgar por el volumen desbordado debían ser muy considerables? ¿Qué tipo de facies los caracterizaba? Si eran lagos, ¿dónde están los materiales lacustres, y si era el mar dónde están los marinos s.s.?

IV. Clima

¿Qué tipo de clima existía durante la sedimentación de las facies permotriásicas? ¿Fue constante durante todo el período de tiempo que registran, o por el contrario sufrió algunas variaciones? Si esto último fuera cierto, ¿de qué manera afectaría o se registrarían en la sedimentación? La coloración rojiza tan típica de estas facies, ¿cuándo se produjo y a qué es debida? ¿Cabe la posibilidad de que sea heredada? Por otra parte, se habla en general de una acusada aridez pero en ciertos momentos, la serie revela la existencia de ríos meandriformes, con canales por lo general perennes. ¿Ello indicaría que la aridez, por lo menos en algunas ocasiones, es mucho menor de lo imaginado? ¿Bajo qué condiciones climáticas se originaron los paleosuelos, por otro lado muy frecuentes en el tiempo?

V. Bioestratigrafía y cronoestratigrafía

¿Es factible datar estas series con datos procedentes de los escasos estudios palinológicos? ¿Qué grado de fiabilidad existe en las dataciones efectuadas en base a restos de polen y esporas, cuando a mayor abundamiento, los niveles que presentan palinomorfos determinables son muy

esporádicos? ¿Por qué no se encuentra fauna de vertebrados en estas facies y sí, localmente, abundantes huellas de pisadas?

VI. Eustatismo-sedimentación

¿Cómo influyen las variaciones globales del nivel del mar en la sedimentación continental? ¿Qué papel juegan realmente el eustatismo, la subsidencia y la tasa de sedimentación en el relleno de cada una de estas cuencas? ¿Qué influencia ejerce la evolución tectónica en el relleno de una cuenca de este tipo? ¿Son ampliables a todo el Permotriás los criterios sobre el establecimiento de UTS de GARRIDO y VILLENA (1977) para el Triásico de la Península? La curva eustática global es prácticamente desconocida en el Pérmico y tan sólo se obtiene con cierto detalle a partir del Triásico. Si a ello unimos que se desconoce cómo estos movimientos eustáticos quedan registrados en las series fluviales, el análisis de cuenca queda limitado, por la dificultad que representa el poder establecer equivalencias temporales entre series de una misma cuenca espacialmente separadas, y agravado aún más cuando estas series pertenecen a cuencas distintas.

VII. Modelo de sedimentación

A pesar de los datos bibliográficos existentes, relativamente abundantes, sobre estos sedimentos, no ha sido aún factible la obtención de un modelo general de sedimentación satisfactorio, parcial o total para las cuencas permotriásicas. A lo sumo, se han realizado análisis de cuenca locales o parciales, ya por estar limitados por la superficie del área investigada, ya por el tramo de sedimentos estudiados.

* * *

El objetivo de esta tesis es la resolución de algunos de los problemas que antes se han esbozado, aunque sea de una forma parcial. De ellos, tan sólo se tratarán facetas referentes a petrología sedimentaria y a facies y dentro de éstos, aunque no en su totalidad, a ciertos estudios sobre el área fuente, a las relaciones entre el eustatismo y el relleno de la cuenca, y, finalmente, a la obtención de un modelo de sedimentación acorde con las observaciones realizadas en el campo.

2.3. OBJETIVOS CONCRETOS

El objetivo primero y principal de este trabajo es el de estudiar la petrología de las series permotriásicas de las Baleares y compararla con la de las series de análogas características y edad más cercanas del litoral mediterráneo.

Este objetivo principal, que en el fondo es de índole petrológico y paleogeográfico, conlleva otros objetivos más concretos, aunque no por ello menos importantes, que en parte, ya han sido abordados por otros autores: el establecimiento de una estratigrafía en base a unidades litoestratigráficas de cada una de las áreas; la descripción de las facies de cada cuerpo estratigráfico para conocer los medios sedimentarios en los que se depositaron estas series rojas; la caracterización de litosomas por su composición petrográfica y por el tipo de área de procedencia de sus materiales; el establecimiento de relaciones entre la petrología y las facies sedimentarias que presentan sus materiales, para definir lo más detalladamente posible, el ambiente o ambientes paleogeográficos locales o areales y su variación en el tiempo y en el espacio.

Aunque sea a modo de ensayo, se ha intentado también relacionar la sedimentación de estas series rojas con el momento eustático global. Para ello, no sólo se ha intentado comparar la evolución de las series estratigráficas con la curva eustática global existente en la bibliografía, sino dar una explicación, en este sentido, a los diferentes grupos de facies, así como a la ciclicidad que presentan.

Los materiales que incluyen esporas y polen en un estado de conservación que permita una determinación específica son rarísimos. Por ello, la realización de estudios bioestratigráficos fiables de estas series es un objetivo que, en la actualidad, está muy lejos de disponer de los medios necesarios para abordarlo. Si bien, los problemas bioestratigráficos escapan completamente de los objetivos planteados en este trabajo, para la separación del Pérmico y del Trías en las columnas, cuando ha sido posible, se han utilizado datos suministrados por los estudios de palinología, publicados o inéditos, procedentes en su mayoría de la documentación complementaria del Plan MAGNA del ITGE.

2.4. METODOLOGIA DE TRABAJO

Para poder alcanzar los objetivos anteriormente expuestos se ha seguido una metodología de trabajo que puede calificarse de clásica en los estudios de petrología sedimentaria y de facies. En este trabajo se ha considerado imprescindible la toma de datos, siendo en la mayoría de los casos, un hecho personal e intransferible. De esta manera se evita caer en el frecuente defecto existente en la literatura geológica de ir reinterpretando los datos obtenidos en el campo por otros autores. Además, a medida que va evolucionando la ciencia, la toma de datos en el campo (el verdadero laboratorio del geólogo), se realiza con un criterio distinto y acorde con el grado de evolución del pensamiento.

Por ello, no es de extrañar que en un trabajo de índole petrológica, en lugar de ceñirse a un simple muestreo en el campo utilizando las columnas realizadas por autores precedentes, se hayan medido y descrito de nuevo las series estratigráficas y las facies en ellas representadas. La descripción de los afloramientos se ha realizado siguiendo la distribución en zonas que se ha efectuado en el capítulo anterior, es decir, Cordillera Costero Catalana, Menorca, Mallorca y Cordillera Ibérica. Del estudio parcial de cada zona se procurarán obtener conclusiones de ámbito regional, para, a partir de éstas y a modo de síntesis, extraer las conclusiones de carácter general, válidas para el área que abarca la zona de estudio.

La metodología de trabajo seguida puede agruparse en los siguientes apartados:

2.4.1. Litoestratigrafía y Geología de facies

A lo largo del área de estudio se han realizado un total de 23 series estratigráficas en los afloramientos que, por su calidad de exposición, así lo han permitido. Estas columnas, en la medida de lo posible, se han correlacionado, fruto de lo cual es la construcción de paneles de correlación por áreas o subcuencas de estudio. En algunos casos, dada la imposibilidad de medir una única serie completa se ha obtenido y representado una serie sintética, en base a cortes parciales. No obstante, en estos casos se indica la situación de los mismos y el tramo de la serie sintética que abarcan.

Las series se han subdividido en unidades litológicas para su mejor reconocimiento y manejabilidad. Esta subdivisión ha conducido a poder garantizar los diferentes ciclos de facies y sus variaciones a lo largo de las series y esto, a su vez a definir los ambientes sedimentarios más característicos reconocidos en cada zona.

Cada una de las series ha sido dibujada a dos escalas diferentes, una de detalle a escala 1:100, y otra sintética a escala 1:500. La primera, que registrará todas aquellas características de los materiales que se han observado en el terreno, no se ha incluido en la memoria por razones de espacio. La segunda mostrará, tan sólo, las características comunes que han posibilitado el reagrupamiento de capas o niveles. Esta última irá incluida en el texto, intercalada en la descripción de su serie correspondiente y, además, será utilizada para confeccionar los paneles de correlación.

2.4.2. Estratigrafía secuencial

Esta novedosa metodología de trabajo, aplicada por el momento a cuencas marinas de márgenes pasivos, debería asimismo poder aplicarse a la sedimentación fluvial.

La falta de bibliografía al respecto ha obligado a replantear una serie de cuestiones que, en la mayoría de los casos, hoy por hoy, son aún imposibles de contestar.

- ¿Cómo influyen las variaciones del nivel del mar en la sedimentación continental? Si se registra este tipo de variaciones en el nivel de base global de las aguas continentales, ¿qué tipo, en orden de magnitud, de secuencias deposicionales producirían? ¿Cuál es su orden temporal? ¿Cómo son las parasecuencias? ¿Son equivalentes a los ciclos de facies? ¿Qué significado tendrían los paleosuelos y a qué escala deben considerarse? ¿Cuál es el significado posicional del punto de equilibrio?, etc.
- En estas secuencias fluviales, ¿cómo quedan representados los *lowstand*, *transgressive* y *highstand system tracts* y cuál es su rango temporal?
- ¿Qué papel juegan realmente el eustatismo, la subsidencia y la tasa de sedimentación

en el relleno de una cuenca? y ¿qué relación mantienen con los fenómenos de avulsión?

- En la curva eustática de HAQ et al. (1987) para el Pérmico Superior y Triásico Inferior se pueden observar algunas variaciones fuertes del nivel del mar y del *on lap* costero. ¿Cómo quedan reflejadas estas variaciones en la sedimentación continental? ¿Es aplicable esta curva al registro sedimentario de la cuenca o cuencas permotriásicas del litoral mediterráneo y balear? ¿Tenemos que replantearnos el valor de algunas discordancias existentes en las series de estas cuencas?
- Si estos movimientos eustáticos son consecuencia del glaciario, ¿qué relación existe entre la capacidad erosiva de los glaciares y la de transporte-sedimentación de la red fluvial sincrónica o inmediatamente posterior a éstos?

La recopilación de datos de facies obtenidos anteriormente se ha intentado integrar en un modelo tectoeustático, desarrollado en base a la separación de distintas secuencias deposicionales o de grupos de ellas. Las ideas sobre las que se ha basado este modelo han sido extraídas, por un lado, de la literatura (VAIL et al., 1977; HAQ et al., 1987; POSAMENTIER et al., 1988; POSAMENTIER y VAIL, 1988, y VAN WAGONER et al., 1990) y, por el otro, producto de observaciones propias.

2.4.3. Petrología sedimentaria

Durante la realización de las columnas estratigráficas se efectuó el muestreo sistemático de las mismas, recogiendo además todas aquellas muestras que se consideraron interesantes por sus facies. Este muestreo se realizó tanto de la fracción arena como de la fracción pelítica, llegándose a recopilar un total de 331 muestras destinadas a su posterior estudio de laboratorio.

El estudio de la fracción arena se ha realizado mediante el análisis al microscopio petrográfico de como mínimo una lámina delgada por cada muestra. Para una mejor identificación de la mineralogía se han empleado tinciones selectivas de feldespato potásico (cobalto-nitrito sódico) y de carbonatos (alizarín roja S + ferricianuro-K;

LINDHOLM y FINKELMAN, 1972). Para la cuantificación de los distintos componentes de la roca se han seleccionado 85 láminas delgadas, sobre las que se ha realizado un conteo de 500 puntos, siguiendo el método de GAZZI-DICKINSON. Estos datos texturales y composicionales han sido recogidos de forma sistemática, sobre un estandillo elaborado especialmente para este estudio (tabla 1). Los porcentajes de los distintos componentes vienen reflejados en las tablas que se incluyen en los correspondientes apartados petrográficos.

El análisis de las muestras recogidas en los niveles pelíticos no se ha podido incluir en esta memoria, debido fundamentalmente a la elevada dedicación que requiere este tipo de estudios.

2.4.4. Trabajo de Gabinete. Redacción de la Memoria

Para poder comparar los datos procedentes de la geología de facies y de la petrología sedimentaria se ha procedido a la representación gráfica de columnas, paneles de correlación, columnas de facies, triángulos de representación de datos petrográficos, etc. La síntesis e interpretación de los mismos ha permitido llegar a unas conclusiones que resuelven, en unos casos, los problemas planteados en los objetivos y, en otros, hacen aflorar nuevas cuestiones que abordar en el futuro.

Como colofón a este estudio se ha redactado la presente memoria en la que se incluyen los diversos problemas planteados en los objetivos, las diferentes metodologías que se han seguido para su resolución y los resultados finales a los que se ha llegado.

3. LA CORDILLERA COSTERO CATALANA

3.1. INTRODUCCION

La cuenca de sedimentación a la que pertenecía el área hoy ocupada por los Catalánides durante el Triás Inferior se ha originado, como clásicamente se acepta, como consecuencia del juego de fracturas tardihercínicas de dirección NE-SO, alineación que en la actualidad sigue este conjunto orográfico paralelo a la línea de costa. Esta

coincidencia de direcciones es la causante de que, prácticamente los afloramientos de la cuenca triásica catalánide estén cortados en la misma orientación que este sistema de fallas, es decir, que pertenezcan a un corte longitudinal de esta posible cuenca *rift*. Las variaciones de potencia y facies se han atribuido al efecto producido por fracturas perpendiculares a la dirección principal del graben, probablemente sin-sedimentarias, causantes de cambios locales en la subsidencia.

Los materiales del Triásico Inferior y más concretamente los de facies Buntsandstein, que afloran a lo largo de la Cordillera Costero Catalana, fueron citados y estudiados en los trabajos clásicos de VERNEUIL y COLLOMB (1853), VEZIAN (1856), BAUZA (1876), GOMBAU (1877), MALLADA (1890), MAURETA y THOS (1881), ALMERA (1891, 1897, 1900, 1902, 1909 y 1913), WURM (1913) y VILASECA (1920).

Tres han sido los estudios que corresponden a verdaderos mojones en el conocimiento del Triásico: las tesis de doctorado de LLOPIS (1947), VIRGILI (1958) y MARZO (1980). En las dos primeras se sientan las bases de la estratigrafía general del Triásico y en la tercera de la litoestratigrafía y de la geología de facies del Buntsandstein. En el tiempo que transcurre entre una y otra tesis aparecen publicaciones de carácter puntual o local. MARZO y CALVET (1985), no obstante, revisan y sintetizan los estudios sobre el Triásico de los Catalánides. Agrupan los afloramientos del Triásico Inferior, tal como MARZO (1980) había propuesto, en «dominios» caracterizados por presentar una sucesión litológica de características similares y diferenciales de otros grupos. Estos dominios de la parte nororiental a la suroccidental son: el del Montseny-Llobregat, el de Garraf y el de Miramar-Prades-Collejou. Cada uno de los dominios se caracteriza por unas unidades litoestratigráficas determinadas definidas informalmente por MARZO (1980).

A pesar de la gran cantidad y calidad de los estudios que sobre el Buntsandstein de los Catalánides se han realizado históricamente, la línea de investigación que plantea la petrología de los materiales ha sido completamente olvidada a lo largo de los años.

	Qm Quartz monocrystalline		
	Qpc Coarse-grained polycrystalline quartz 2-3 crystals		
	Qpc Coarse-grained polycrystalline quartz > 3 crystals		
	Qpf Fine-grained polycrystalline quartz		
	Qp Quartz in plutonic rock fgm.		
Q	Qv Quartz in volcanic rock fgm.		
	Qmm Quartz in medium-grade metamorphic rock fgm.		
	Qml Quartz in low-grade		
	Qsd Quartz in sandstone		
	COs Calcite or Dolomite replacements on quartz (single crystals)		
	COrf Calcite or Dolomite replacements on quartz (in rock fgm.)		
	Ks K-feldspar (single crystals)		
K	Kp K-feldspar in plutonic rock fgm.		
	CKs Calcite or Dolomite replacement on K-feldspar (single crystals)		
N	Ps Plagioclase (single crystals)		
C	Pp Plagioclase in plutonic rock fgm.		
E	CPs Calcite or Dolomite replacement on plagioclase (single crystals)		
	Sd Sandstone matrix in rock fgm.		
	Vi volcanic rock fgm.		
	PK microgranular rock fgm.		
	Lgm Low-grade metamorphic rock fgm.		
L	Mgm. medium-grade metamorphic rock fgm.		
	Sh. Shale + siltstones rock fgm.		
	Chv Chert-vulcanite		
	Chr Chert-radiolarite		
	Ch Chert undeterminate		
	Cl Calcite or Dolomite replacements on fine-grained lithic		
	Bi Biotite (single crystals)		
	Ms Moscovite (single crystals)		
	Chl Chlorite (single crystals)		
	Mml Micas and chlorites in medium-grade metamorphic rock fgm.		
	Oth Other minerals		
C	Cp Carbonate pedogenetic fgm.		
N	Ncpf Non carbonate pedogenetic fgm. (Ox.Fe-silt, Mica-silt, Rip up clast)		
C	Mtca Filosilicatic matrix		
	Mtsi Siliciclastic		
	Qc Quartz cement		
	Cc Calcite cement		
	Dc Dolomite cement		
	Fec Ferruginoso cement		
	DFec Dolomite Fe cement		
	Bc Baritina cement		
	Ac Anhidrite cement		
	FKc K-feldspar cement		
	Kaolinita cement		
	Ilita cement		
	Inter. I-E, Cl-E-Ox.Fe cement		
	Cx Calcite cement replacements undetermined grains		
	Dx Dolomite cement		
	Coating ferruginoso		
	Cp Patchy calcite		
	Dp Patchy dolomite		
	Porosity		
	At Alterites		
	TAMAÑO:		
	REDONDEZ:		
	SELECCION:		
	TIPO DE CONTACTO:		
			TOTAL

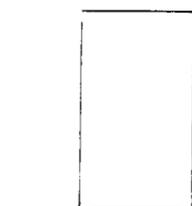


Tabla 1.—Clases petrográficas utilizadas en el análisis modal. NCE: granos extracuencales no carbonáticos; Cl: granos intracuencales carbonáticos; NCI: granos intracuencales no carbonáticos (modificado de ZUFFA, 1985).

3.2. SITUACION DE LAS SERIES

Los afloramientos de facies Buntsandstein en la Cordillera Costero Catalana son casi continuos y presentan una distribución de NE a SO, extendiéndose desde el Montseny al N hasta el «Bloque del Cardó», en las inmediaciones de la desembocadura del río Ebro. Siguiendo en parte las directrices marcadas por MARZO (1980) este área de afloramientos se ha subdividido en cuatro sectores o dominios atendiendo a su posición geográfica y caracterizados (MARZO, 1980) por su composición litoestratigráfica. Dominio o sector del Montseny al N, sector de Garraf y sector de Miramar al centro y sector de Prades-Coldejou al S (fig. 7). Se ha realizado un total de 19 series que han servido para establecer las características litoestratigráficas más importantes, la mayoría de las cuales fueron ya analizadas y descritas en las publicaciones de los autores

que se citan con anterioridad. De estas series medidas con un mismo criterio y que representan un mero banco de datos de campo se han obtenido un total de 224 muestras, que han servido de base al estudio petrográfico.

3.2.1. Sector del Montseny

Este sector abarca el área comprendida entre el macizo del Montseny y el río Llobregat. En los afloramientos de este sector se han realizado un total de siete series estratigráficas y se han recogido 91 muestras para el estudio de laboratorio. La situación exacta de estas series viene reflejada en la fig. 8 y se agrupan en dirección N-S (1, Serie de EL BRULL; 2, Serie de TAGAMANENT, y 3, Serie de EL FIGARO) y NE-SO (4, Serie de TORRENOVA; 5, Serie de SANT. SEBASTIA DE MONTMAJOR; 6, Serie de la auto-

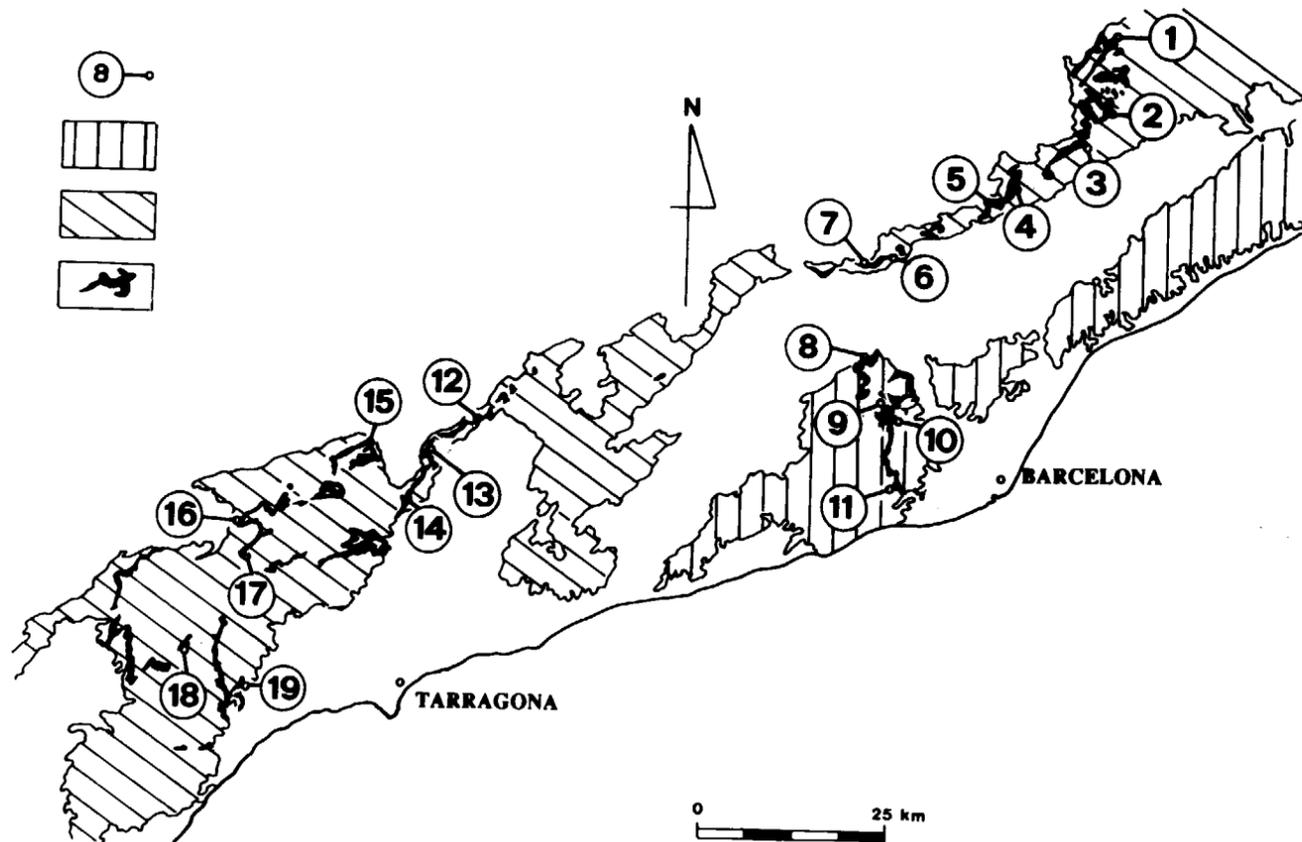


Figura 7.—Esquema cartográfico de los afloramientos permotriásicos y de situación de las series estratigráficas de la Cordillera Costero Catalana.

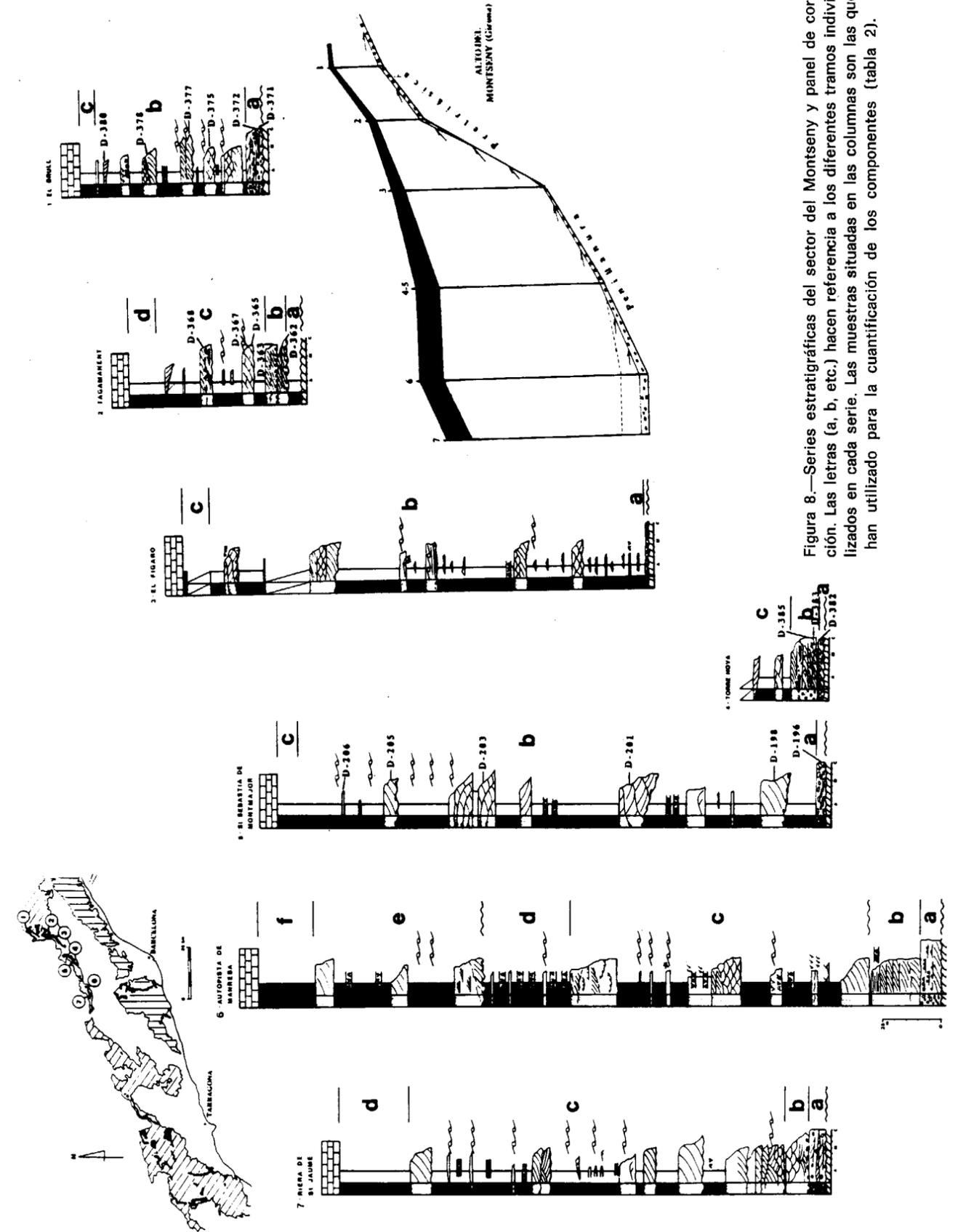


Figura 8.—Series estratigráficas del sector del Montseny y panel de correlación. Las letras (a, b, etc.) hacen referencia a los diferentes tramos individualizados en cada serie. Las muestras situadas en las columnas son las que se han utilizado para la cuantificación de los componentes (tabla 2).

pista de MANRESA, y 7, Serie de la RIERA DE SANT JAUME).

Este conjunto de series tiene dos límites establecidos: el septentrional, un umbral que abarcaría el Montseny y el área ocupada por el alto de La Selva y el Gironés (puesto que el primer afloramiento que se considera ya como típicamente pirenaico se sitúa en el Alt Empordà, en las inmediaciones de Masaracs y St. Climent Sescebes) y que representaría probablemente el límite de la cuenca pirenaica; el meridional, coincide con la dirección tectónica o falla del Llobregat.

3.2.1.1. *El Triásico del llano de Barcelona*

En el llano de Barcelona, concretamente en la calle Ceuta, cerca del Turó del Carmel y en Montgat, junto al Campo Municipal de deportes, afloran testimonios de la serie roja del Triás Inferior con un grado de tectonización muy elevado que impide la confección de series estratigráficas de detalle. No obstante, en estos afloramientos se ha reconocido la presencia del nivel de facies conglomerático-areniscosas dispuestas en barras y canales típicos de ríos trenzados y del nivel suprayacente de canales pertenecientes a ríos meandriformes. La constatación de estos niveles, en unos afloramientos de baja calidad es muy importante por interpretarlos como la continuidad del área septentrional hacia el SE.

3.2.1.2. *Visión de conjunto*

La discontinuidad de los afloramientos es la que justifica, dentro de la Cordillera Costero Catalana, la realización de análisis parciales de la cuenca en grupos de series realizados en las áreas cartográficas distinguidas en la introducción del estudio estratigráfico de los Catalánides.

La serie estratigráfica de este sector septentrional puede dividirse en tres unidades caracterizadas por su litología y facies y que son consecuencia de un mismo momento tectosedimentario.

La serie roja del Triás de este sector fosiliza una superficie de erosión modelada con anterioridad a la sedimentación del Triás (penilla-

nura pretriásica de SOLE, 1939). En el área del Montseny los litosomas triásicos hacen *down lap* sobre esta superficie.

El límite superior de esta unidad triásica roja lo constituye la serie carbonatada del Muschelkalk Inferior. El contacto es brusco y probablemente discordante a escala regional.

Estos sedimentos de facies Buntsandstein, litológicamente se han dividido en tres niveles: el inferior conglomerático, el intermedio pelítico y areniscoso y el superior pelítico.

a) *Nivel conglomerático inferior*

Lo constituyen los conglomerados y areniscas de la base que fosilizan los relieves paleozoicos. Afloran al N y S del área, es decir en las series del Montseny y en las del sector de Olesa. Ambos grupos de afloramientos no presentan diferencias notables ni en cuanto a la composición litológica de los cantos, lo que revelaría un área fuente de naturaleza similar, ni en cuanto a las facies, ya que en ambos casos son iguales (aluviales en canales trenzados), por lo que se han considerado como depósitos correlativos.

Tanto en uno como en otro sector, los conglomerados están formados, en su totalidad, por cantos de rocas difícilmente erosionables. Rocas o materiales que aguantan fácilmente varios ciclos sedimentarios o bien que son el producto de unas condiciones paleogeográficas especiales: fuerte meteorización química y transporte muy lento de los materiales, lo cual facilitaría la existencia de un conglomerado residual que, al reactivarse la red hidrográfica (por causas tectónicas y/o eustáticas) fácilmente se acumularían en áreas deprimidas. El dominio de materiales resistentes a la erosión como el cuarzo y la moscovita (material que debe considerarse como residual y por lo tanto de gran duración en el ciclo externo), contrastan con el tipo de sedimentación rápida como sería la acumulación en pequeños abanicos aluviales constituidos predominantemente por barras y canales en régimen trenzado.

b) *Nivel de pelitas y areniscas de la parte media*

El contacto entre este nivel y el infrayacente,

con gran probabilidad, corresponde a una superficie de discordancia. Esto no es posible de determinar teniendo en cuenta tan sólo los afloramientos observados. Sin embargo, en este momento existe un cambio neto en las condiciones de erosión-transporte-sedimentación, cambiando bruscamente de un régimen aluvial trenzado, mal desarrollado y de incidencia local, a un régimen generalizado de ríos en regímenes meandriformes. Este nivel está formado por una serie predominantemente pelítica en la que se intercalan cuerpos de areniscas de granulometría, potencia y geometría distintas: unos de granulometría fina, de potencia que raras veces alcanza 0,5 m y que, a la escala del afloramiento, están limitados por planos paralelos; el otro grupo con granulometría media, espesor por lo general superior al metro, geometría canaliforme y contacto inferior erosivo y superior plano.

c) *Las pelitas de la parte alta*

Las pelitas de la parte alta poseen una potencia muy variable. Probablemente, este nivel no presenta un desarrollo uniforme pues en las series del sector de Olesa poseen un mayor desarrollo que en las marginales o del Montseny. El contacto con las calizas del Muschelkalk Inferior es neto, mientras que el contacto con su infrayacente b) es difícil de establecer (dificultado por hallarse generalmente cubierto por derrubios de pendiente) y se sitúa en el momento en que disminuye el porcentaje de capas de areniscas intercaladas.

3.2.2. **Sector de Garraf**

El sector de Garraf corresponde a una franja de afloramientos de materiales triásicos, de dirección NO-SE, situados en el margen derecho del río Llobregat. Se han elaborado cuatro series, alineadas sensiblemente paralelas al trazado del río. Son las de Martorell (8), Cervelló (9), Santa María de Cervelló (10) y Castell d'Eramprunyà (11) (fig. 9).

3.2.2.1. *Visión de conjunto*

Los afloramientos del margen derecho del río Llobregat se hallan cartográficamente aislados de los del Montseny y de los situados en áreas

más occidentales. Constituyen un conjunto de afloramientos en los que se individualizan dos tramos separados por una superficie de discordancia detectable en todas las series y correlacionable con un alto margen de fiabilidad. Esta discordancia puede ser interpretada como un fenómeno local, aunque no por registrarse en un área reducida tiene que responder asimismo a un fenómeno localizado, como producto de un momento tectónico o como respuesta a una causa eustática. Tanto en uno como en otro caso, en esta superficie de discordancia, aunque con reservas, podría localizarse el límite entre la sedimentación pérmica y la triásica, es decir, emplazarse en la misma el límite entre las eras Primaria y Secundaria. Ello queda por el momento como una mera teoría de trabajo.

El nivel superior, post-discordancia, igualmente puede dividirse en dos por su composición litológica y de facies: uno inferior, conglomerático-areniscoso y uno superior, pelítico areniscoso. El contacto entre ambos, asimismo podría corresponder a una superficie de discordancia.

Nivel inferior

Este nivel es de facies conglomerática dominante, con un mayor desarrollo en las series situadas más hacia el S. Estos conglomerados yacen discordantemente sobre materiales paleozoicos ligeramente rubefactados. Su composición y organización habla en favor de un transporte corto y rápido con la resedimentación de los materiales residuales en disposición de ser rápidamente transportados en el momento en que la cuenca sedimentaria comienza a funcionar como tal (fenómeno de «vacuidad»). Ello no quiere decir que las superficies erosivas entre diferentes cuerpos canalizados no impliquen un lapso de tiempo importante.

Nivel superior

Sobre la superficie de discordancia se desarrollan dos tramos de facies y características distintas: uno, en el que dominan las areniscas y conglomerados y otro, en el que dominan las pelitas. El areniscoso conglomerático posee un desarrollo mayor en las áreas más meridionales de los afloramientos, mientras que los pelíticos predominan en las áreas septentrionales. El pri-

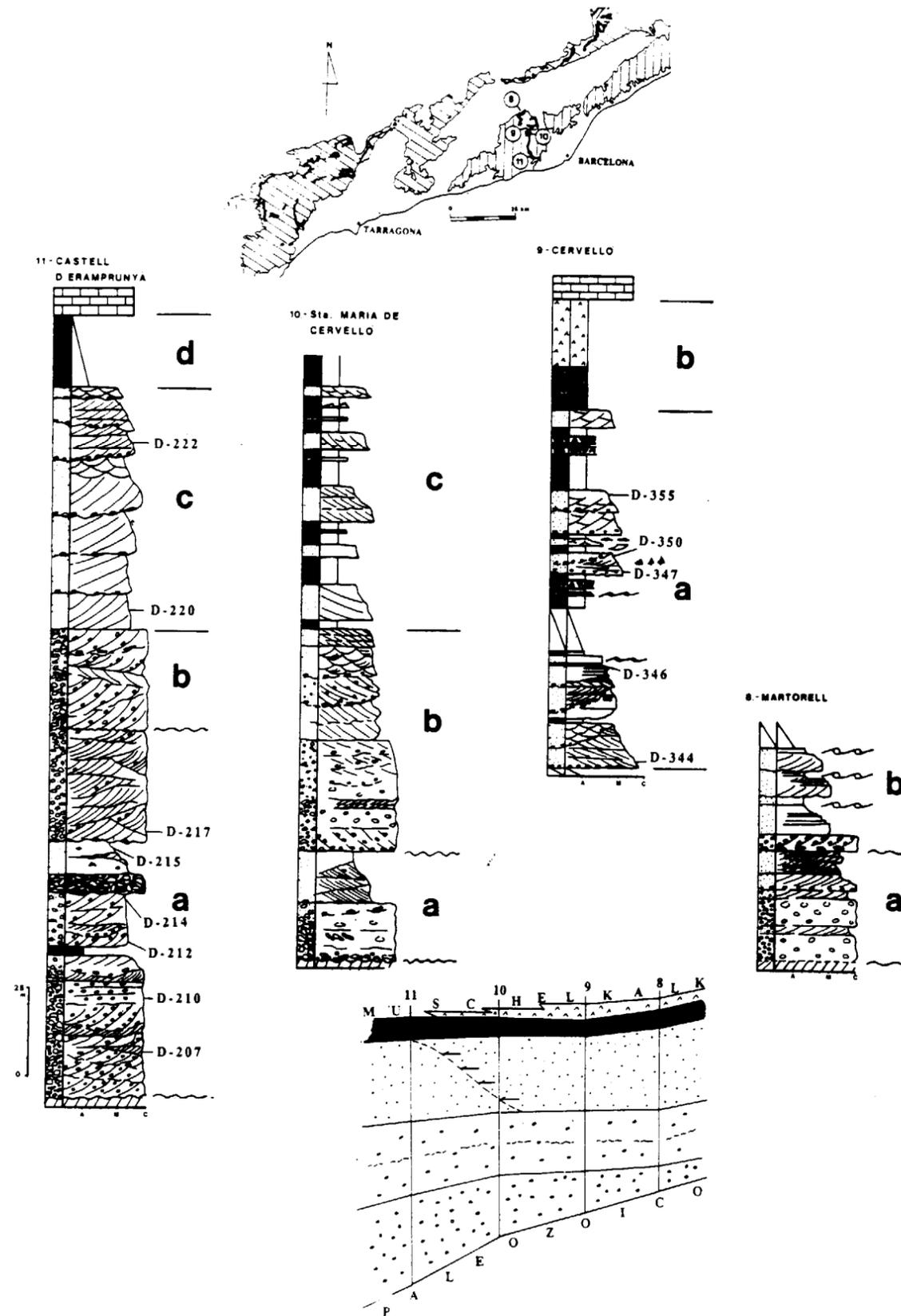


Figura 9.—Series estratigráficas del sector de Garraf y panel de correlación. Las letras (a, b, etc.) hacen referencia a los diferentes tramos individualizados en cada serie. Las muestras situadas en las columnas son las que se han utilizado para la cuantificación de los componentes (tabla 2).

mero posee una facies típica de cauces fluviales (aluviales) de tipo trenzado. Los segundos, de tipo meandriforme, donde la sedimentación de finos, correspondiente a las áreas de desbordamiento, revela la naturaleza e intensidad del transporte realizado a lo largo de los canales.

La interpretación más fácil para ambas unidades es que el primer tramo corresponda a la parte proximal de abanicos aluviales, bajo un régimen climático húmedo, y el segundo tramo a la parte distal en un régimen meandriforme. A pesar de ello y a falta de datos de campo más detallados, cabe también la interpretación de que se trate de dos sistemas superpuestos en el tiempo y discordantes entre sí: uno de origen local (de facies, desarrollo y origen similar al nivel infrayacente) y otro con un desarrollo regional más amplio, correspondiente a un régimen fluvial de tipo meandriforme. En este momento, las series situadas más al S (Castell d'Eramprunyà) ocuparían una posición marginal dentro del «valle» fluvial meandriforme donde se depositaban los materiales.

Las evaporitas de la parte alta de la serie de Cervelló pueden tener un doble origen; o bien se trata de un depósito de *playa lake* relacionado con lagos efímeros salinos ligados a áreas distales de un medio endorreico, o bien está relacionado con la transgresión del Muschelkalk y corresponde a sistemas de *sabkas* que marcan la mezcla de las primeras aguas marinas.

3.2.3. Sector de Miramar

Corresponde a un área muy localizada donde los afloramientos de Buntsandstein son escasos. Tan sólo han podido realizarse tres series, alineadas de NE a SO, pero que por su facies y continuidad de afloramiento se han considerado con personalidad suficiente como para individualizar un área sedimentaria con características que la diferencian de las demás, dentro de la cuenca de sedimentación. Las series que se han medido, de NE a SO son Serie de Cabra del Camp (12), Serie de Coll de Lilla (13) y Serie de La Riba (14) (fig. 10).

3.2.3.1. Visión de conjunto

El Buntsandstein de la sierra de Miramar aflora

en dos áreas con continuidad lateral. A la situada más al N pertenecen las series de Cabra del Camp y del Coll de Lilla y a la situada más al S pertenece la serie de La Riba. Aunque las series de ambas áreas no tengan características muy comunes, se han considerado sedimentadas en un mismo sector dentro de la cuenca permotriásica de los Catalánides.

La serie estratigráfica puede considerarse dividida en tres partes separadas por superficies con valor de discordancia (fig. 10): la inferior, conglomerática; la intermedia, arenoso-conglomerático-pelítica y la superior, pelítica. La conglomerática corresponde a un depósito aluvial sedimentado bajo un régimen de canales y barras en un ambiente aluvial trenzado; puede considerarse, en un sentido amplio, como depósito residual, probablemente pérmico, sedimentado en los primeros momentos del relleno del *rift*; constituye la parte inferior de la serie de La Riba, lo que explica su mayor potencia respecto a las otras dos series, que ocuparían una posición más marginal (fig. 10). El nivel intermedio presenta más intercalaciones pelíticas en la serie de La Riba y va haciéndose más arenoso-conglomerático hacia las series del Coll de Lilla y Cabra del Camp, donde ocupa una posición muy cercana al contacto con el Paleozoico. Se han depositado en un medio fluvial mucho más desarrollado, en el cual van apareciendo con el tiempo los depósitos de desbordamiento de los canales, paleosuelos y canales meandriformes. Corona la serie un tramo pelítico, asimismo de inundación fluvial, en el que esporádicamente existen pequeñas cuencas lacustres (en sentido amplio) con la sedimentación de evaporitas (serie de Cabra del Camp).

3.2.4. Sector de Prades-Colldejou

El área geográfica que comporta este sector se extiende desde la sierra de Prades hasta el río Ebro. Los afloramientos más importantes son los existentes en las bases de las sierras de Prades y de Colldejou, al N del bloque del Cardó, separados por el Paleozoico del Priorat. Dadas sus características litológicas y de facies muy similares, ambos conjuntos de afloramientos se han considerado como pertenecientes a una misma área de sedimentación. No obstante, en la sierra de Prades, la potencia de las series disminuye

notablemente con respecto a las registradas en los anteriores sectores, mientras que en los afloramientos de la sierra de Colldejou (donde las facies son similares a las anteriores), las potencias son mayores. En la «mesa de Prades» se han realizado las series de Mina Atrevida (15), Siurana (16) y Alforja (17) y en la base de la Mola de Colldejou las de Falset (18) y Montroig (19) (fig. 11).

3.2.4.1. Visión de conjunto

Si bien las series realizadas en la base de la sierra de Prades y las realizadas en el extremo N del bloque del Cardó presentan espesores en conjunto distintos, las características litológicas y de facies generales son muy parecidas.

Las series de facies Buntsandstein de la sierra de Prades poseen un espesor que, por término medio, puede evaluarse en unos 80 m y las de la base del extremo N de la Mola de Colldejou, superan siempre el centenar de metros. En conjunto, existe un aumento progresivo de potencia de NE a SO.

Aparentemente, las series son monótonas y compuestas por dos tramos: uno conglomerático-arenoso y otro pelítico, en contacto aparentemente discordante. Estos dos tramos quedan más individualizados en las series de la sierra de Prades que en las del bloque del Cardó, donde el tramo superior es menos perceptible por alcanzar muy poco desarrollo.

En la serie conglomerática y en las inmediaciones de la base pueden diferenciarse dos tramos separados por una débil discordancia angular, poco perceptible en el terreno, pero que se evidencia en todas las columnas estratigráficas. Las características litológicas, de facies y de potencia son prácticamente iguales entre ambas áreas.

El tramo arenoso-conglomerático suprayacente adquiere un desarrollo mucho mayor en las series meridionales que en las septentrionales, mientras que el tramo pelítico de la parte alta, que representa un tercio de las series de la «mesa» de Prades, es prácticamente inexistente en el Buntsandstein de Colldejou.

3.3. SINTESIS SOBRE EL BUNTSANDSTEIN DE LA CORDILLERA COSTERO CATALANA

La primera síntesis sobre la litoestratigrafía del Buntsandstein de la Cordillera Costero Catalana se debe a VIRGILI (1958). Con la tesis doctoral de MARZO (1980) esta síntesis queda enriquecida mediante un detallado análisis de facies que, en líneas generales, sigue siendo válido en nuestros días. Estudios posteriores tan sólo modifican muy parcialmente el modelo de síntesis litoestratigráfica propuesto por este último autor.

El análisis estratigráfico de esta nueva tentativa de síntesis se basa en la reelaboración de datos de campo de nueva recopilación. Este análisis hará hincapié en: la diferenciación de unidades litoestratigráficas y la relación geométrica entre ellas, los tipos de facies, las variaciones de potencia, las paleocorrientes, los contactos de base y techo que delimitan las series y en la posible edad de estos materiales.

3.3.1. La arquitectura estratigráfica

El Buntsandstein de la Cordillera Costero Catalana presenta unas unidades litológicas bien diferenciadas, que en síntesis son: una inferior conglomerática, una intermedia arenosa y una superior pelítica y localmente evaporítica.

La inferior conglomerática, que no aparece en todas las series, posee un reducido espesor, está limitada por superficies de discordancia, yace sobre el zócalo hercínico y se halla cubierta por la unidad arenosa de la parte media del Buntsandstein. Este conglomerado basal está formado en su gran mayoría por cantos cuarcíticos unidos, por lo general, por una escasa matriz. Cabría interpretarlos como un depósito residual producto de un transporte prolongado en el espacio y/o en el tiempo, facilitando así la meteorización y transformación de cantos sincrónicos de naturaleza litológica distinta. Este depósito residual es el testimonio de un prolongado lapso de tiempo; su organización actual es tan sólo el reflejo de los últimos estadios de transporte que los ha concentrado.

La intermedia, arenosa, incluye localmente, cantos de cuarzo esporádicos, alineados según

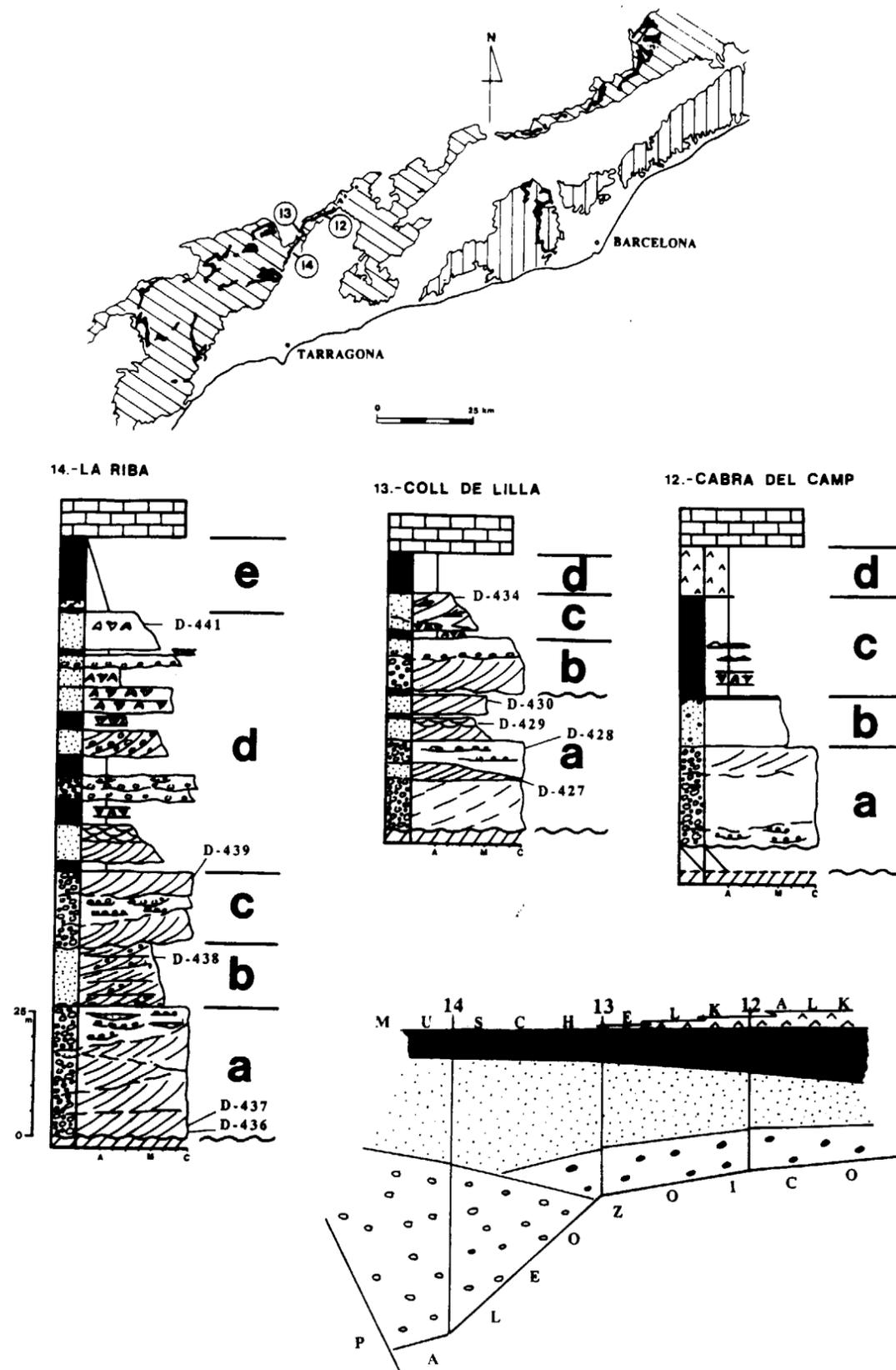


Figura 10.—Series estratigráficas del sector de Miramar y panel de correlación. Las letras (a, b, etc.) hacen referencia a los diferentes tramos individualizados en cada serie. Las muestras situadas en las columnas son las que se han utilizado para la cuantificación de los componentes (tabla 2).

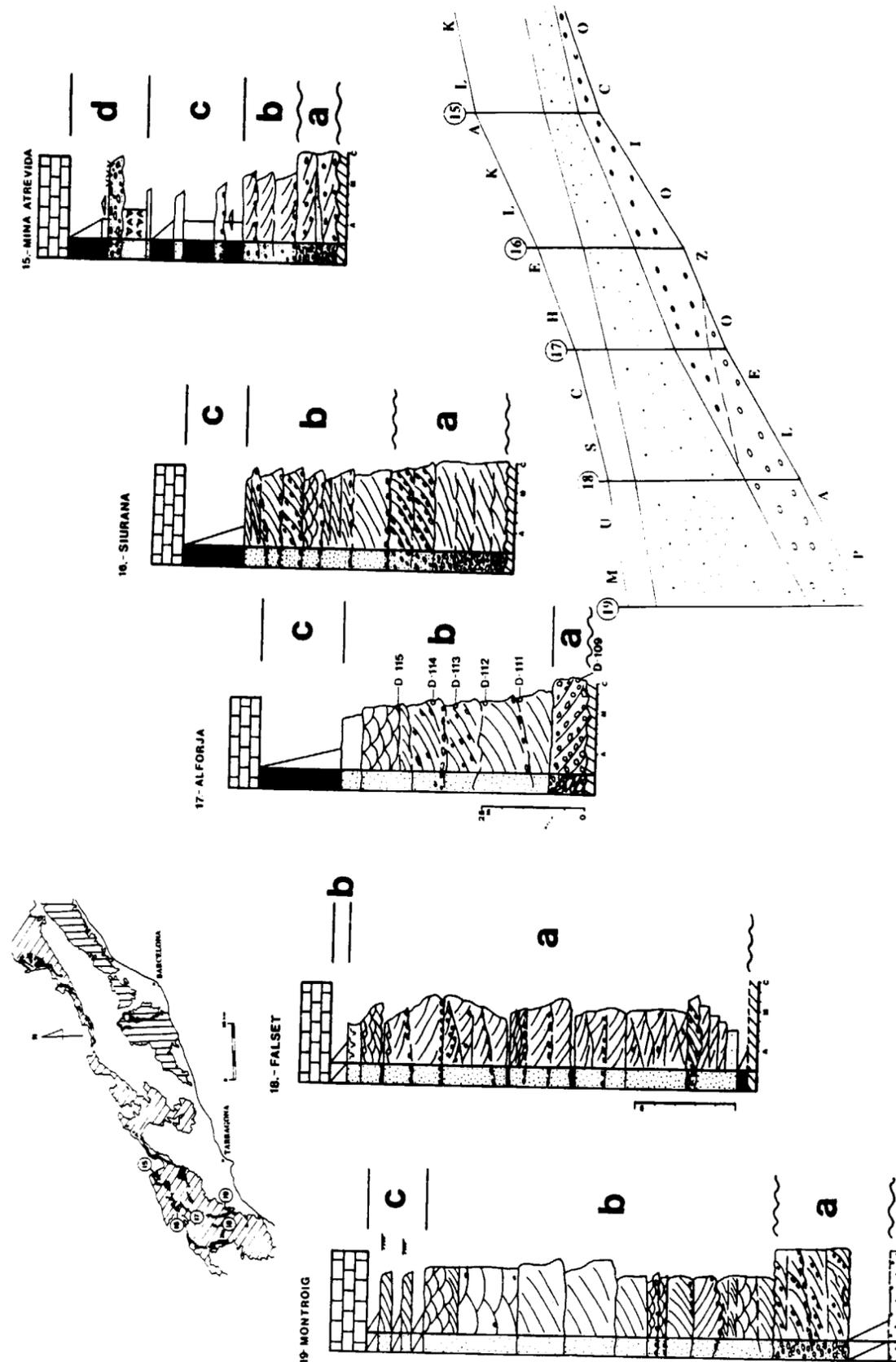


Figura 11.—Series estratigráficas del sector de Prades-Colldejou y panel de correlación. Las letras (a, b, etc.) hacen referencia a los diferentes tramos individualizados en cada serie. Las muestras situadas en las columnas son las que se han utilizado para la cuantificación de los componentes (tabla 2).

superficies erosivas (o de reactivación), o formando verdaderas cuñas en las areniscas. Este nivel arenoso varía de potencia a lo largo de la Cordillera Catalana, adquiriendo, en general, espesores mayores en la parte meridional que en la septentrional de la misma. Presenta una tendencia a la fosilización de la discordancia que le separa de su yacente y a la uniformización del relieve sobre el que se depositará con posterioridad el tramo pelítico. El contacto entre ellas, aunque con muchas reservas (puesto que no ha podido constatarse en el campo), corresponde a una superficie de discordancia de origen tectónico causante de un cambio paleogeográfico regional.

La unidad litoestratigráfica pelítica presenta en la parte inferior abundantes intercalaciones de niveles de areniscas, en la parte superior, paleosuelos y en su techo, localmente, evaporitas. Su espesor, al contrario de lo que ocurre en la unidad infrayacente, es mayor en las series septentrionales que en las meridionales.

3.3.2. Las facies

Las descripciones de facies en sistemas fluviales son muchas veces difícilmente comprensibles, dada la confusión existente en la nomenclatura de las mismas. Nomenclatura geográfica, geodinámica o sedimentológica y estratigráfica, utilizada para la descripción de las facies sin, muchas veces, aclarar las acepciones de los términos utilizados, tanto en las partes descriptivas como en las interpretativas.

Las facies se describirán siguiendo el orden establecido en las unidades litoestratigráficas diferenciadas en el apartado anterior.

La unidad inferior conglomerática, probablemente ha fosilizado tan sólo el último momento de su evolución geológica, quedando borrada o enmascarada una larga historia que podría abarcar la totalidad o casi totalidad del Pérmico. Presenta, a veces, en sus capas basales algunos depósitos que pueden calificarse de coladas fangosas, a veces lavadas dejando un depósito residual de cantos con escasa matriz. En su mayoría, se halla organizada en barras con estratificación cruzada planar marcada bien por la alineación de los cantos, o bien rellenando superficies erosivas.

El nivel arenoso presenta siempre unas facies muy constantes: barras con un mayor o menor desarrollo en extensión y potencia (llegando a un máximo de 11 m), con una estratificación constante planar, asintótica en la base y con frecuentes superficies reactivadas, y pequeños canales limitados por superficies erosivas, marcadas por alineaciones de cantos de cuarzo o pelíticos, que cortan a las anteriores con estratificaciones cruzadas en surco. Su sedimentación, probablemente muy rápida (a corta distancia de su área fuente), corresponde a un sistema de abanicos aluviales con cursos trenzados, como ha venido interpretándose clásicamente (MARZO, 1980; MARZO y CALVET, 1985), MARZO (1986), en la parte alta de esta unidad (en la serie del Castell d'Eramprunyà), describe facies arenosas que atribuye a un depósito eólico. Nada tiene de extraño que en una serie fluvial o aluvial, en momentos de estiaje, los materiales depositados en un cauce sean retrabajados por la acción del viento.

El nivel pelítico que corona la serie posee, con predominio hacia la base, intercalaciones de niveles lenticulares de areniscas.

Dentro de los niveles de areniscas pueden distinguirse tres tipos de cuerpos cuyas características sedimentológicas, por lo tanto genéticas, los individualizan:

- Niveles de areniscas lenticulares con el contacto inferior erosivo (canaliforme), de espesor de orden métrico, que constituyen un ciclo estrato y granodecreciente, con una manifiesta acreción lateral y que se ha interpretado como barras de meandro. La granulometría de las areniscas es, por lo general, mediana. Con gran probabilidad, el ritmo de la subsidencia marca la frecuencia con que estos canales se intercalan en la serie pelítica.
- Areniscas de grano fino a muy fino, generalmente un solo estrato, limitado por planos paralelos a la escala del afloramiento, con láminas paralelas en la base (raras) y *climbing ripples*. Con frecuencia se hallan total o parcialmente bioturbadas con, a veces la presencia de *burrows*, algunos debidos a raíces (rizocreciones) y otros a organismos desconocidos, y, muy raramente, a pisadas de reptiles. Se han interpretado como pro-

ducto de desbordamientos cuyos materiales se han depositado en áreas de inundación.

- c) Niveles lenticulares, con base plana y techo abombado, por lo general entre 0,5 y 2 m de espesor y con una extensión lateral relativamente corta. Estos lentejones poseen una organización compleja. Están constituidos por dunas formadas por areniscas de grano medio a fino, que lateralmente presentan *climbing ripples*, y capas de microconglomerados en forma de *sand waves* en el sentido de SOUTHARD (1975). Estos asimismo, lateralmente, a medida que van acuñándose, van pasando a areniscas de grano fino a muy fino con *climbing ripples*. Cada uno de estos niveles, en conjunto puede considerarse como un ciclo estrato y granocreciente. Los cantos de estos microconglomerados son intracuencales y constituyen un depósito residual de concreciones calcáreas diagenéticas (caliche) y *rip-up-clasts* organizados en *sand waves* (descritos ampliamente en el apartado 3.4.3.2). Lateralmente, estos lentejones pasan de forma rápida pero gradual a los materiales predominantemente pelíticos de la llanura de inundación. Hacia el área donde se encontraba el canal del cual procedían, se encuentran cortados por una superficie de erosión, que los separa de las pelitas, que, a su vez, probablemente constituyen el tapón de arcilla (*clay plug*) del canal meandriforme. Estos lentejones se interpretan como depósitos de dique o margen (*levee*) de los canales meandriformes, cuando éstos eran activos. Son pues, depósitos de desbordamiento en los que los cuerpos conglomeráticos intraformacionales son producto residual de la erosión de suelos, que comportan la formación de nódulos carbonáticos.

En este nivel pelítico que corona la serie, asimismo pueden distinguirse dos tipos de facies pelíticas:

Las inferiores rojas, que presentan niveles, con predominio en la parte alta del tramo, afectados por una mayor o menor intensidad de edafización llegando a formar verdaderos paleosuelos con diferentes estados de evolución.

Y las superiores, asimismo rojizas, con intercalaciones de otras verduzcas, aparte de una estratificación lenticular con lentejones de arenis-

cas de grano muy fino, presentan raras formaciones estromatolíticas y frecuentes lentejones ricos en evaporitas. Constituyen unas facies donde el influjo de las mareas comienzan a dejarse sentir como preludio de la transgresión del Muschelkalk Inferior.

Tanto unas pelitas como otras corresponden a depósitos desbordados ligados a un sistema fluvial y/o deltaico. Las superiores, sin duda alguna, han sido distribuidas intermitentemente por corrientes mareales (supramareal).

3.3.3. El medio sedimentario y su evolución en el tiempo

El medio sedimentario, en el cual se han depositado estos materiales del Buntsandstein, ha evolucionado desde un sistema aluvial, de corto recorrido y pequeña pendiente, a uno aluvial con un mayor desarrollo en potencia y en extensión (probablemente coincidiendo con un máximo en la subsidencia) en un régimen trezado, hasta uno fluvial de régimen meandriforme que enlaza con una llanura costera a través de la cual se inicia la transgresión del Muschelkalk Inferior, en donde los sedimentos terrígenos identan con los evaporíticos.

Probablemente, esta evolución del medio sedimentario debe su causa a un ascenso del nivel del mar global, con un envejecimiento regional de la red hidrográfica que conllevaría poco transporte de material grosero y un abundante desbordamiento de material fino. Así pues, se considera a los tramos inferiores conglomeráticos y areniscosos como depositados bajo un régimen trezado, en un momento de nivel del mar relativamente bajo (aunque sea en período de ascenso) y de origen y sedimentación local; y al tramo meandriforme como depositado en un momento de nivel del mar relativamente alto, con carácter expansivo y de ámbito mucho más regional.

3.3.4. La edad

Uno de los problemas que en la actualidad queda por resolver es el de la datación del Pérmico y Triásico Inferior en facies Buntsandstein. Con las técnicas actuales de preparación de polen

y esporas es casi imposible abordar esta cuestión, dado el estado de conservación de éstos en los sedimentos rojizos de estas series. Tan sólo se han podido identificar en muy esporádicas muestras (casi siempre en el techo de las series), en las que su estado de conservación facilita la determinación específica; en el resto es, hoy por hoy, imposible. Así pues, la bioestratigrafía, salvo en la parte más alta de la serie de edad Anisiense (SOLE DE PORTA et al., 1987), es prácticamente desconocida. La presencia de esporádicos restos de vertebrados (algunos restos óseos y trazas de pisadas) así como de vegetales, no son suficientes para conocer su edad. Al no existir criterios bioestratigráficos ni cronoeestratigráficos, la correlación a grandes distancias es una tarea imposible. Los criterios litológicos, en litosomas con variaciones tan rápidas de facies, son imposibles de aplicar, exceptuando aquellos niveles de paleosuelos producto de un paro suficientemente prolongado de la sedimentación que, para una correlación a corta distancia, pueden, con reservas, ser utilizados. Presentan, no obstante, el problema de que estos niveles se hallan, por lo general, cubiertos por vegetación y/o derrubios y son difícilmente seguibles en el campo. Además, nada tiene de extraño que en un régimen fluvial, sometido a repetidas fases de erosión y sedimentación, algunos de estos niveles de paleosuelos hayan sido parcial o totalmente erosionados.

Una tentativa de datación, sin base paleontológica alguna podría ser: los conglomerados basales, discordantes con el resto, representarían la sedimentación pérmica (Pérmico Superior, MARZO, 1980). La serie areniscosa aluvial depositada en un medio trezado representaría el Escitiense (VIRGILI, 1958; MARZO, 1980) y la unidad superior, fundamentalmente pelítica, el Anisiense VIRGILI (1958), tal como SOLE DE PORTA et al. (1987) constataron palinológicamente.

3.4. PETROLOGIA DE LOS DEPOSITOS ARENOSOS

3.4.1. Introducción

El objetivo de este capítulo es el caracterizar, desde un punto de vista petrológico, las areniscas de la sucesión permotriásica, con la finalidad de recopilar el mayor número de datos posi-

ble en los que fundamentar la génesis y evolución de dichos depósitos. Este estudio se ha estructurado en tres partes bien diferenciadas. En la primera, se describirá la petrografía de las rocas en las diferentes áreas de estudio, redundando en los caracteres texturales y composicionales. En la segunda, se estudiará su procedencia deducida a partir de los datos composicionales y, finalmente, en la tercera, se abordará el análisis de todos los procesos post-sedimentarios que afectan a dichos depósitos y que quedan englobados en la literatura bajo el término de diagénesis.

El estudio mineralógico de los niveles lutíticos intercalados en dicha sucesión, en relación con la mineralogía de los cementos, o con otros procesos diagenéticos de los depósitos arenosos, representa una temática de máximo interés que excede el ámbito de los objetivos propuestos en este trabajo. Su estudio, no obstante, se encuentra en curso de realización y sus resultados se expondrán en futuras publicaciones.

Los datos obtenidos, a partir del análisis modal realizado sobre los componentes de las muestras que han sido estudiadas al microscopio petrográfico, quedan expuestos de manera resumida en la tabla 2.

Además, se han realizado diferentes representaciones gráficas de dichos componentes con vistas a su clasificación, análisis de procedencia, condiciones climáticas del área fuente, evolución de los cementos en las diferentes columnas, así como para hacer resaltar la presencia de algún componente o la relación que entre ellos pueda existir, en el caso de que por su peculiaridad sea preciso destacar para la mejor caracterización de estos depósitos.

3.4.2. Caracteres texturales

Los depósitos detríticos de la serie permotriásica tienen representados todos los tamaños granulométricos, desde conglomerados hasta lutitas, produciéndose una disminución general en el diámetro de los clastos hacia el techo de las series. Estadísticamente, el valor medio, y en general el más ampliamente representado, es el intervalo comprendido entre 0,25 y 0,125 mm.

La redondez medida sobre los granos de cuarzo

Nº muestra	Qm	Qpc2-3	Qpc>3	Qpf	Qp	Qml	Qsd	CQs	Qt	Ks	Kp	CKs	P
SERIE Nº 1 EL BRULL													
D-371	31	5,6	4,8	1,8	0	2,8	0	0	46	0	0	0	0,2
D-372	26,2	8,3	15,8	6,6	0,2	2,8	1,2	0	61,1	0	0	0	0,5
D-375	27,1	8,4	9,2	1	0,2	3,3	0,8	0	50,1	10,3	0	0	0,2
D-377	16,3	12,4	16,8	1,5	0,7	2,6	0,7	0,2	51,2	10,2	0,4	6,5	0,2
D-378	14,5	7,8	15,1	3,2	0,7	1,7	0,2	0,7	43,7	14	0	0,7	0,2
D-380	21	7,8	13	2,1	1,1	1,6	0,2	1,1	47,9	7,3	0,2	1,1	0,2
SERIE Nº 2 TAGAMANENT													
D-362	22,9	6,3	4,1	2,1	0	2,3	0,4	0,8	38,9	10,7	0	1	0,2
D-363	22	9	15,5	3,1	0,4	5,8	0,4	0	56,3	6,5	0	0,2	0
D-365	17,9	10,1	8,7	0,4	0,6	3,7	0,4	0	41,9	14,2	0,2	0	0
D-367	20,3	7,9	11,5	1,3	1,4	2,5	0,2	0,5	45,7	12,1	0	0,5	0
D-368	17	7,5	13,9	1	1	1,2	0,2	1,9	43,5	11	0,2	1,3	0
SERIE Nº 4 TORRENOVA													
D-382	9,2	4,7	24	0	9,8	3,5	1,8	0	52,9	7,4	5,3	1,2	0
D-383	19,2	11,2	17,6	1	10,8	2,2	0	0	62	6,9	2,5	0,4	0
D-385	23,7	5,3	7,4	0,8	3,8	1,9	0	0	43	7	1,7	0	0,2
SERIE Nº 5 ST.SEBASTIA													
D-196	14,7	5,1	14,3	0,2	0	13,8	0,7	0	48,7	0,7	0,5	0	0
D-198	15,9	5,5	16,3	1	2,9	5,3	0	0	46,8	7,1	0	1,8	0
D-201	14,4	8,5	14,2	1	1,4	2,9	0	0,2	42,7	10,1	0,8	0,4	0
D-203	10,1	9,2	28,9	2	2,6	4,2	0	3,1	60	10,3	1,1	1,1	0
D-205	15,8	11,2	24	0,5	0,9	8,4	0,5	0	61,2	10,7	0,7	0	0
D-206	15,8	11,8	18,6	0,4	2,4	5,5	0,2	0,4	55,3	13,8	0,4	0,4	0,4
SERIE Nº 11 CASTELL D'ERAMPRUNYA													
D-207	22,5	8,8	16	3,5	1,2	3,5	0	0	55,6	0	0	0	0
D-210	26,9	13,2	21,4	0,2	0	2,2	0	0	63,9	0	0	0	0
D-212	24,1	12	14,6	1,2	0	3,3	0,2	0	55,3	0	0	0	0
D-214	26,3	11	19	1,6	0	3,3	0	0	61,2	0	0	0	0
D-215	23,9	12,1	25	0	0	2,4	0	0	63,4	0	0	0	0
D-217	34,7	12,6	15,3	2,7	0,4	2,1	0	0	67,8	1,4	0	0	0
D-220	34,4	14	18,6	1,9	0,2	1,5	0,2	0	70,8	4,4	0	0	0
D-222	32,4	19,8	24	2,1	0	0,7	0	0	79	1,2	0	0	0
SERIE Nº 9 CERVELLÓ													
D-344	25	13,4	30,9	1,5	0	1	0	1	72,8	0,5	0	0,7	0
D-346	28,4	16	25	0,6	0,6	2	0	0	72,6	6,8	0	0	0
D-347	15,3	12,5	17,8	0,8	0,8	3,3	0,6	0,6	51,5	13,2	0	0,2	0
D-350	20,6	11,9	14,8	0,4	3,7	3,7	0	0	55,1	8,2	1	0,6	0,4
D-355	21,1	8,3	11,2	0,4	0,8	2,7	0	0	44,5	13,7	0,6	0,4	0
SERIE Nº 14 LA RIBA													
D-436	15,3	7,6	17,1	0,2	3,9	0,8	2,5	0,4	45,7	0	0	0	0
D-437	29,4	12,1	21,2	2,2	0	4	0,2	0	69,2	0	0	0	0,2
D-438	20,6	17,3	31,6	1,4	0,2	4,2	0	0	75,4	0	0	0	0
D-439	20,7	14,3	33,2	2,2	0	3,4	0,4	0	74,2	0	0	0	0
D-441	41,6	12,2	13,4	0,4	0,6	0,2	0	0	68,4	7,5	0	0	0
SERIE Nº 13 COLL DE LILLA													
D-427	22,4	12,2	36,9	3,7	0	4,4	0	0	79,5	0,5	0	0	0,2
D-428	25,8	14,4	33,6	2,1	0	2,1	0	0	78,1	0,2	0	0	0
D-429	18,7	16,5	33	3,6	0	2,4	0	0	74,2	0	0	0	0
D-430	21	13,7	31,9	2,3	0	2,7	0	1,9	73,5	0	0	0	0
D-434	20,1	11,2	23,9	1,5	0,9	1,8	0,2	0	60,2	4,1	0	0	0,4
SERIE Nº 17 ALFORJA													
D-109	21,9	14	27,1	4,7	0	2,6	0,2	0	70,4	1	0	0	0
D-111	15,9	13,9	33,3	2,6	0	2,1	0,6	0	68,2	1,3	0	0	0
D-112	22,4	13,1	28,3	2	0,7	3	0,4	0	69,8	0,9	0	0	0
D-113	22,7	15	18,1	0,7	0,4	1,6	0	0	58,5	1,4	0	0	0
D-114	19,4	20,2	30,6	0,8	0	2,4	0	0	73,4	1,4	0	0	0
D-115	21,3	15,2	28,3	1,8	0	3,6	0,4	0	70,6	1,2	0	0	0

Tabla 2.—Porcentajes modales de los diferentes componentes de las areniscas de la Cordillera Costero Catalana, a partir del conteo de puntos realizado según la tabla 1.

	PK	Lgm	Sh	Ch	Bl	Ms	Oth	Cpf	Ncpl	Mtfl	Mtsl	Qc	Cc	Dc
SERIE Nº 1 EL BRULL														
D-371	0,2	23,8	0	0	0,2	1,2	0	0	1	0	4,8	1,8	0	0
D-372	0	19,6	4	0	0	0	0,2	0	1,2	0	0,7	6,1	0	0
D-375	0	8,4	0	0,6	0,6	0,2	0,4	0	0	0	0	10,1	0	3,7
D-377	0,4	5,4	0	0,2	0	0,7	0,2	0	0	0	0	8,1	0	3,9
D-378	0,3	7,8	0,2	0	0,3	0,5	0,2	0	0	0	1,7	6,5	0	8,1
D-380	0,2	3,8	0,2	0,6	0	0	0,2	0	0,5	0	1,7	3,5	23,1	1,7
SERIE Nº 2 TAGAMANENT														
D-362	0,4	11,7	0	0,2	0	1,2	0,6	0	0	0	1,4	4,9	0	15,2
D-363	0,4	6,3	0	0	0,7	0,2	0	0	0	0,2	0	14,1	0	0
D-365	0,4	13,8	0	1,2	0,2	1	0,2	0	0,4	0	0,2	8,5	0	0
D-367	0	4,7	0	0,4	0	0	0,2	0,5	1,4	0	0	7,7	3,6	5,6
D-368	0,6	6,7	0	0,4	0	0,8	0	0	0	0	0	11,4	17,7	0
SERIE Nº 4 TORRENOVA														
D-382	0	4,3	0	0	2,1	0,4	0	0	0	11,7	11,5	0,8	0	0
D-383	0,2	4,7	0	0	2,5	0,2	0,2	0	0	11	8	0,2	0	0
D-385	0	10,8	1,3	0,2	0	1,3	4,7	0	0	0	12,3	0,4	0	0
SERIE Nº 5 ST.SEBASTIA														
D-196	0	34,4	0	0	0,8	0,2	0,5	0	0	0	0	6,1	0	0
D-198	0	12	0,6	0,4	0,4	0	0	0	0,2	0	0,6	2,6	11,4	0
D-201	0	13,4	0	0	1	0,8	0,2	0	0,4	0	0,6	7,8	9,5	0
D-203	0,2	5,5	0	0,7	0	0,4	0	0	0	0	0	5	0,9	10,9
D-205	0,5	20	0	0,2	0,7	0,7	0,2	0	0	0	0	2,1	0,5	0,2
D-206	0,7	17,3	0	0	0,7	0,7	0,9	0	0	0	0	2	2,9	0
SERIE Nº 11 CASTELL D'ERAMPRUNYA														
D-207	0,2	24,9	0,4	0,2	0,6	0,2	0	0	3,3	0,2	2,3	0,2	0	0
D-210	0	12	0,4	0,2	0,2	0,4	0	0	2,8	1,2	2	0,4	0	0
D-212	0,2	23,9	0	0	0,4	0,4	1	0	3,1	1,2	1,2	0	0	0
D-214	0	14,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,8	0	2,9	0	1,6	0	0	0
D-215	0	11,9	0	0	0,2	0,2	0	0	2	7	0,6	0	0	0
D-217	0	5,4	0	0	0,2	0,2	0	0	0	18,6	0,6	0	0	0
D-220	0	2,7	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0,8	11,3	0	0
D-222	0	1,7	0	1	0	0,2	0,2	0	0	0	0,5	6,9	0	0
SERIE Nº 9 CERVELLÓ														
D-344	0	1	0	0,5	0	0	0	0	0,2	0	0	5,9	0	13,9
D-346	0	4	0	0,2	0	0,4	0	0,4	0	0	0	7,2	0	3,4
D-347	0,2	9	0	0	1,3	2,3	0	0	0	0	0	5,4	0	12,5
D-350	0	7	0	0,2	0,2	1	0	3,7	0,4	0	0,2	2,7	0	2,1
D-355	0	8,5	0	0,4	0,6	1,4	0,4	3,7	1	0,6	1,7	1,9	0	8,1
SERIE Nº 14 LA RIBA														
D-436	0	8,7	12,6	1,4	0	0	0	0,2	2,9	1,6	3,3	0,4	0	11,2
D-437	0	12,5	0	0,6	0	0,2	0,2	0	0	0,2	0,4	3,6	0	0
D-438	0	8,7	0	0	0	0	0,2	0	0	0,7	0,5	2,8	0	0
D-439	0	4,2	0	0,8	0	0,2	0	0	0	0	1,4	6,2	0	0,2
D-441	0	0,2	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0,2	2	0	12,8
SERIE Nº 13 COLL DE LILLA														
D-427	0	3,9	0	2,8	0	0,2	0	0	0,7	0,2	0,7	3,5	0	0,2
D-428	0	5,2	0	1,4	0	0	0,2	0	0,4	0	1,2	2,5	0	0
D-429	0	4,9	0	1,8	0	0	0	0	0,4	0,2	1,8	3,6	0	0
D-430	0	2,5	0,2	0,6	0	0	0	0	0	0	0	2,7	0	17,9
D-434	0	5,7	0	1,3	0	0	0	5,9	0	0	0,2	2,8	17,3	0
SERIE Nº 17 ALFORJA														
D-109	0	9,9	1	2	0,6	0,2	0,4	0	1	0,2	0	5,1	0	0
D-111	0,9	9,4	3	2,8	0	0,2	0,2	0	1,3	0,4	1,1	3,2	0	0
D-112	0,9	8,7	1,3	1,1	0,2	0,2	0	0	0,4	0	1,5	3,3	0	0
D-113	0,4	18,1	0	0,4	0	0	0,5	0	0,4	0,2	0,9	3,2	0	0
D-114	0,2	8	1,2	0,8	0	0,2	0	0	0,4	0,4	0,6	4,4	0	0
D-115	0	5,7	0	1,4	0	0,2	0	0	0,4	0,6	0,2	6,9	0	2

	DFec	Fec	Ba	An	FKc	Kaol	Il	Tamaño	Redondez	Selección	Contact
SERIE Nº 1 EL BRULL											
D-371	0	17,8	0	0	0	1,4	1,6	0.25-0.125	ang	Muy mala	Punt.,larg
D-372	0	2,8	0,2	0	0	2,8	0,7	0.5-0.35	mrd	Muy mala	Punt.,larg
D-375	0	7,2	0	0	2,7	4,3	1,2	0.25-0.125	subang-subrd	Buena	Puntual
D-377	3,9	3,9	0	0	2	2,6	0	0.25-0.125	subang-subrd	Muy buena	Puntual
D-378	0	7,9	0	0	4,8	2,3	0,8	0.125-0.5	ang	Buena	C-C
D-380	0	3,3	0,6	0,3	3,3	0,3	0	0.25-0.35	muy ang	Buena-Mod.	Punt.,C-C
SERIE Nº 2 TAGAMANENT											
D-362	0	11,5	0	0	2,1	0	0	0.125-0.06	ang	Buena	Punt.,larg
D-363	0	0,2	9,4	0	1,8	3,1	0,4	0.25-0.125	subang	Buena	Puntual
D-365	0	13,8	0	0	3,9	0	0	0.25-0.125	ang	Buena	C-C
D-367	0	1,4	12,1	0	3,2	0,9	0	0.35-0.177	ang	Mod.-mala	Puntual
D-368	0	2,1	0,2	0	3,5	0,6	0	0.25-0.125	ang	Muy buena	Puntual
SERIE Nº 4 TORRENOVA											
D-382	0	0	1,6	0	0	0,8	0	conglomer.	subang	Muy mala	
D-383	0	0	0	0	0	1,2	0	0.35-0.17	ang	Muy mala	
D-385	0	16,7	0	0	0	0,4	0	0.125-0.06	ang	Mala	
SERIE Nº 5 ST.SEBASTIA											
D-196	0	0	0	0	0	8,1	0	0.25-0.125	ang	Buena	C-C
D-198	0,4	13,8	0,6	0	0,6	0,4	0	0.35-0.17	ang	Buena	C-C
D-201	0	3,7	0,2	0	6,8	1,2	0,2	0.25-0.125	ang	Muy buena	C-C,largo
D-203	0	0,4	0	0	2,4	0,9	0,2	0.25-0.125	muy ang	Buena	C-C
D-205	0	0	0	0	1,6	0,5	0,2	0.25-0.125	muy ang	Mod.-buena	C-C
D-206	0	0	0	0	3,1	0,4	1,1	0.25-0.125	ang	Mod.	C-C
SERIE Nº 11 CASTELL D'ERAMPRUNYA											
D-207	0	7,2	0	0	0	4,3	0,4	0.5-0.25	muy ang	Muy mala	C-C
D-210	0	4,1	0	0	0	11,4	1,2	0.35-0.177	ang	Buena-mod.	C-C
D-212	0	4,7	0	0	0	8	0,8	0.35-0.177	ang	Mala	C-C
D-214	0	5,1	0	0	0	11,6	1,6	0.25-0.125	ang	Mod.	C-C
D-215	0	7	0	0	0	7	0,8	0.35-0.5	ang	Mala	Punt.,larg
D-217	0	0	0	0	0	3,5	2,3	0.25-0.35	subang-subrd	Mala	Puntual
D-220	0	5,8	0	0	0	4	0	0.177-0.12	red	Buena	Puntual
D-222	0	6,2	0	0	0	3,1	0	0.5-0.25	subang	Muy mala	C-C
SERIE Nº 9 CERVELLO											
D-344	0	2,2	0	0	0	2,2	0	0.35-0.177	subred	Muy mala	C-C
D-346	2,4	2,2	0	0	0,4	0	0	0.25-0.125	subred	Mod.-buena	C-C
D-347	0	2,1	0	0	1,3	1	0	0.25-0.125	subred	Muy buena	C-C
D-350	8,8	5,8	0	0	1,4	1	0,4	0.25-0.125	subang-subrd	Muy mala	C-C
D-355	3,7	6,2	0	0	0,8	1,2	0,4	0.25-0.125	ang	Mod.	C-C
SERIE Nº 14 LA RIBA											
D-436	0	2,9	1,9	0	0	5,2	0	0-1 conglon	subang	Muy mala	Puntual
D-437	0	2,2	0	0	0	9,5	1,2	0.25-0.125	ang	Buena	C-C
D-438	0	0,5	0	0	0	11,2	0	0.25-0.125	subred	Buena	Largo,C-C
D-439	0	1,6	5	0	0	6	0	0.25-0.125	subang	Buena	C-C
D-441	0	7,7	0	0	0,2	0,8	0	0.25-0.177	subred	Mod.	Puntual
SERIE Nº 13 COLL DE LILLA											
D-427	0	0,7	0	0	0	6,9	0	0.25-0.125	subang	Buena	Largo
D-428	0	2,3	0	0	0	8,3	0,2	0.25-0.125	subred	Buena	Largo
D-429	0	2,7	0,4	0	0	9,6	0,4	0.25-0.125	subang	Buena-mod.	Punt., larg
D-430	0	1,1	0	0	0	1,5	0	0.25-0.125	subang-subrd	Mod.	Puntual
D-434	0	1,5	0	0	0,7	0	0				
SERIE Nº 17 ALFORJA											
D-109	0	5,5	0	0	0,2	2,4	0	0.25-0.125	subred	Mala	Largo
D-111	0	2,3	0,9	0	0	4,3	0,2	0.25-0.125	ang	Buena-mod.	C-C
D-112	0	5,4	1,9	0	0	4,3	0	0.25-0.125	subang	mod.	C-C
D-113	0	11,6	0	0	0	4,5	0	0.177-0.08	subang	Buena	C-C
D-114	0	2,2	1,6	0	0	4,8	0,4				
D-115	0	3,6	4,3	0	0	2,8	0	0.25-0.125	subred	Mod.	Puntual

evidencia una variación clara de base a techo para las series del sector de Garraf (tabla 2) encontrándose los valores más bajos de redondez (muy angulosos-angulosos) en la parte inferior de las series y evolucionando a valores más altos de redondez (subredondeados) hacia el techo, sobre todo a partir de la discordancia erosiva que sirve de correlación para las series de este sector. En las columnas de los sectores de Montseny y Prades este parámetro es muy homogéneo y comprende siempre valores bajos (angulosos y subangulosos).

Al igual que en el primer carácter textural mencionado, estos depósitos presentan todos los valores de selección posibles, no observándose ningún tipo de tendencia. En general, se puede asumir que por término medio los depósitos arenosos presentan una selección de moderada a buena en el sector de Montseny, mala en el sector de Garraf y buena en el sector de Prades.

Del análisis global de los datos expuestos puede deducirse que estos depósitos son inmaduros texturalmente, presentando en el sector de Garraf y en el techo de las series una tendencia hacia una mayor madurez.

3.4.3. Caracteres composicionales

3.4.3.1. Clasificación

Los materiales del Buntsandstein de la Cordillera Costero Catalana no han sido nunca tratados desde el punto de vista petrológico, a excepción de MARZO (1980), que los clasifica por primera vez sin entrar en otro tipo de discriminaciones. Siguiendo los criterios de PETTIJOHN et al. (1972), los depósitos de la sucesión permotriásica pueden ser clasificados como litoarenitas y sublitoarenitas en la base, evolucionando rápidamente hacia el techo a subarcosas (fig. 12).

En el sector de Garraf la entrada de feldspatos se produce a partir de la discordancia erosiva, fácilmente identificable en todo este sector y que se sitúa en el tramo inferior de la serie. En general, la composición subarcósica se alcanza, en todos los sectores, cuando se instalan definitivamente los ambientes fluviales de tipo meandriforme. Sin embargo, cuando el ambiente de sedimentación es aluvial de tipo trenzado, se observa que las series evolucionan hacia el te-

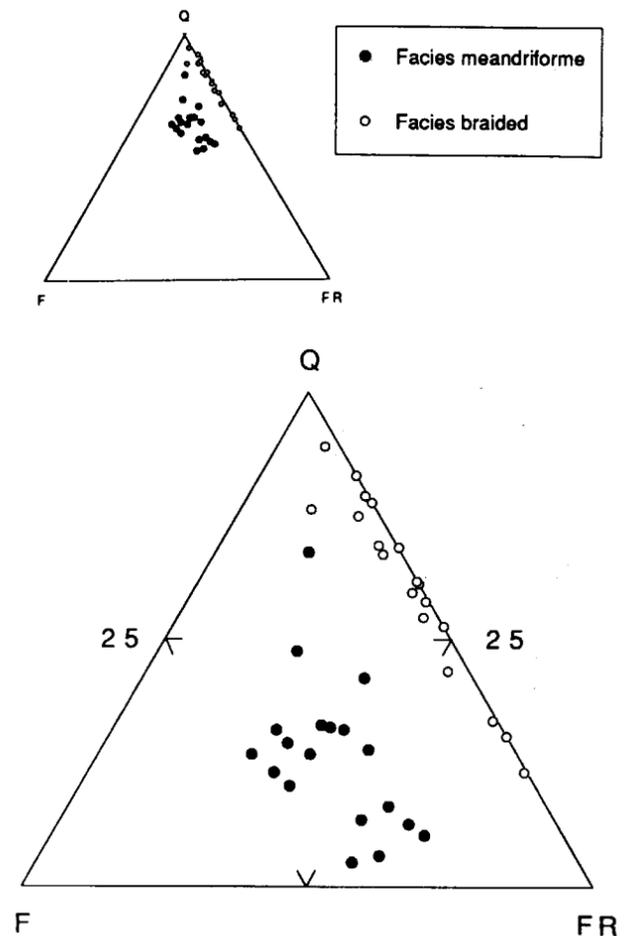


Figura 12.—Composición de las areniscas de la Cordillera Costero Catalana en un diagrama Q-F-FR de PETTIJOHN et al., 1972.

cho a una mayor madurez composicional, concretada en la pérdida paulatina de fragmentos de roca, fundamentalmente de tipo metamórfico de bajo grado. Esto se debería a que en este tipo de ambientes es frecuente el reabajamiento prolongado de los materiales hasta su sedimentación final.

3.4.3.2. Descripción de los componentes

En este apartado se describirán las características, tanto de los componentes detríticos que constituyen el esqueleto y la matriz de la roca, como aquellos cuyo origen está relacionado con los procesos diagméticos (matriz diagmética y cementos). En la tabla 2 se reflejan los contenidos

de los componentes más característicos, que por su importancia se comentarán a continuación.

— El *cuarzo* es el constituyente más importante cuantitativamente del esqueleto de las rocas. Se encuentra como monocristalino y policristalino en similares proporciones. Este último tipo, así como el cuarzo total de las muestras va incrementando su porcentaje de base a techo de las series. A veces, el cuarzo monocristalino presenta hábitos euhedrales (bipiramidados hexagonales) con frecuentes corrosiones magmáticas, alteradas hoy a minerales de la arcilla y óxidos de hierro. Estos granos proceden de la erosión de las rocas filonianas (en general, pórfidos graníticos y granodioríticos biotíticos) que cortan al encajante Paleozoico con direcciones ENE-OSO (ENRIQUE, 1985).

Con la misma mineralogía es frecuente encontrar granos de *chert* en mosaicos microcristalinos con un porcentaje que oscila entre 0,3 por 100. En ocasiones es posible identificar texturas relictas de rocas primitivas correspondientes a texturas traquíticas volcánicas o a estructuras orgánicas como caparzones de radiolarios (fragmentos de radiolaritas), muy frecuentes en el sector de Prades.

— Los *feldespatos* aparecen como feldespatos potásicos y plagioclasas. Los feldespatos potásicos pueden alcanzar porcentajes de hasta el 15 por 100 del total de la muestra. Los más abundantes son del tipo ortosa o microclina y, generalmente, se encuentran recrecidos sintaxialmente, con morfologías idiomorfas y con un aspecto muy fresco, siendo por tanto fácilmente identificables. Existe otra tipología muy minoritaria, con frecuentes inclusiones de plagioclasa y crecimientos peritéticos, siendo más abundantes en el sector de Prades. En general, el contenido en feldespatos potásicos es escaso en la parte inferior de las series y va aumentando hasta llegar a ser muy abundante en el techo de las mismas. Normalmente, los primeros niveles que los contienen suelen presentarlos con un aspecto generalmente muy «sucio», puesto que se encuentran disueltos de manera parcial y afectados a veces, por alteraciones (carbonataciones). Las plagioclasas se presentan siempre en porcentajes inferiores al

1 por 100, aunque presumiblemente su presencia era mayor, puesto que se encuentran muy alteradas a illita y sericita en forma de epimatriz (DICKINSON, 1970), hecho que hace muy difícil su reconocimiento al microscopio óptico.

— Los *fragmentos de roca* muestran una amplia variedad de tipologías que pueden concretarse por orden de importancia en metamórfica, ígnea y sedimentaria. Estas dos últimas no sobrepasan nunca el 15 por 100 del total de la muestra, siendo el 1-3 por 100 el contenido más habitual. La tipología ígnea está representada por rocas plutónicas (granitoides), filonianas de tipo pórfido granodiorítico, y por rocas volcánicas o subvolcánicas ácidas, más frecuentes en el sector de Prades. La tipología sedimentaria está representada por rocas detríticas de tamaño arena (fina a muy fina), limo o arcilla, a veces algo metamorfizadas, más fácilmente identificables en los depósitos conglomeráticos. Los fragmentos de roca metamórficos son fundamentalmente de bajo grado de tipo esquistos micáceos, filitas y pizarras que, en ocasiones, aparecen deformados por la compactación mecánica. Excepcionalmente, pueden alcanzar porcentajes de hasta el 35 por 100 del total de la muestra. Es frecuente que las pizarras se encuentren silicificadas.

Otros componentes integrantes del esqueleto de las areniscas son las micas: moscovita y biotita. Se presentan en cristales laminares frescos de gran tamaño. A veces se encuentran alteradas, transformándose la moscovita a caolinita y la biotita a clorita, oxidándose para dar minerales opacos con hábitos laminares. Su aparición es muy constante pero con contenidos inferiores al 1 por 100, pudiendo alcanzar porcentajes de hasta el 3 por 100 del total de la roca. También se han identificado un conjunto de minerales pesados que se encuentran como accesorios en las muestras y que por orden de importancia son: turmalina, circón, anatasa, epidota, apatito y opacos como ilmenita, piritita y jarosita. Un hecho destacable es que toda esta mineralogía pesada se encuentra fuertemente acumulada marcando la laminación de los sedimentos más finos sobre todo cuando éstos se depositan en capas con laminaciones cruzadas a pequeña escala debidas a *climbing ripples*.

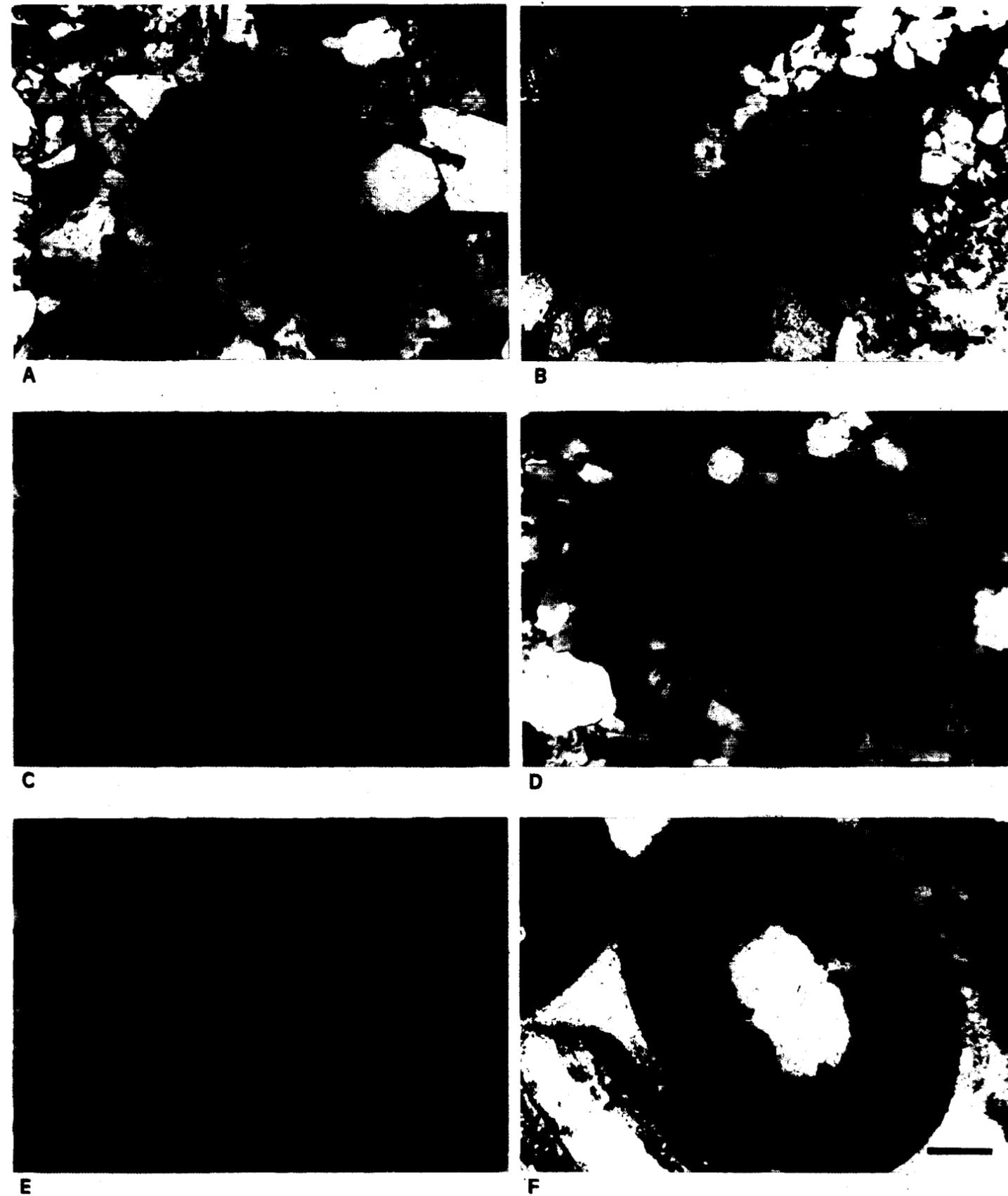
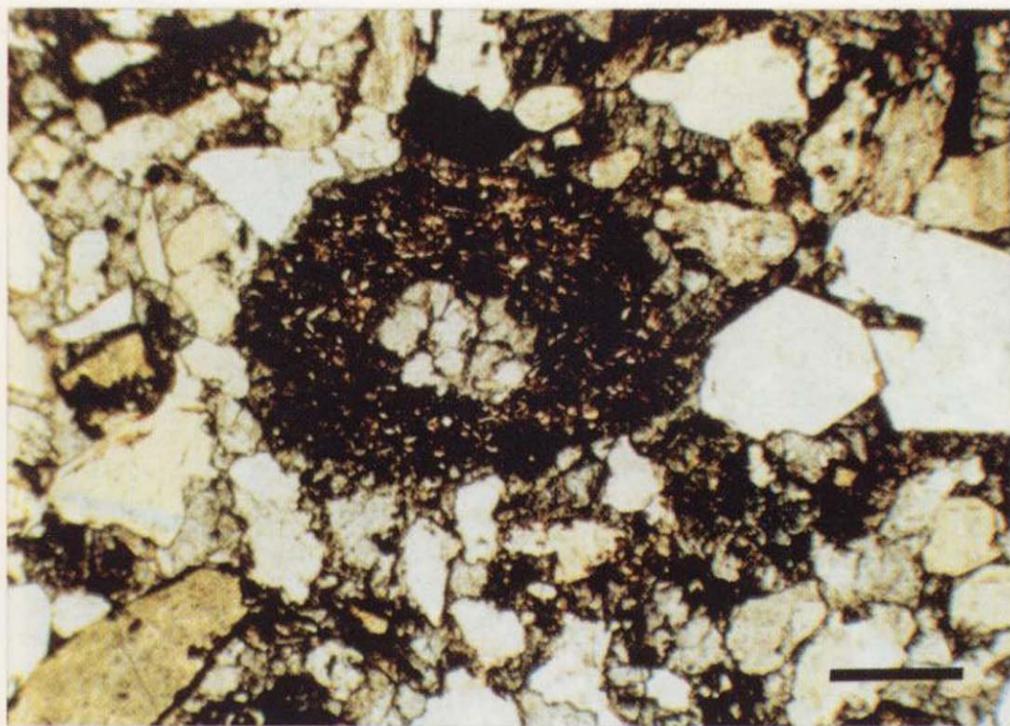
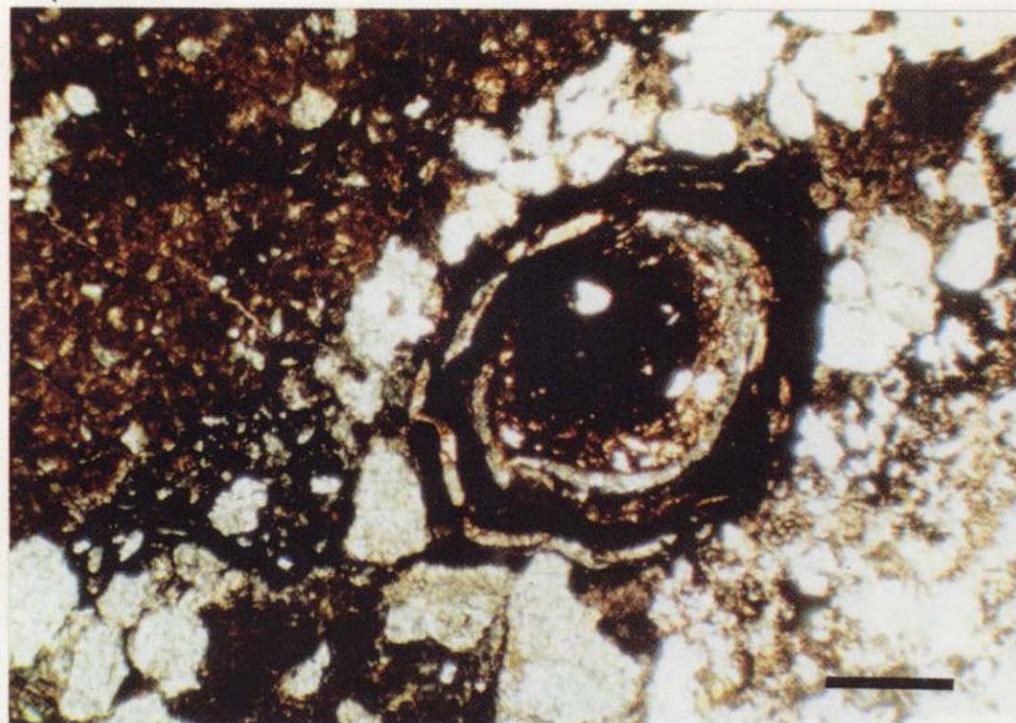


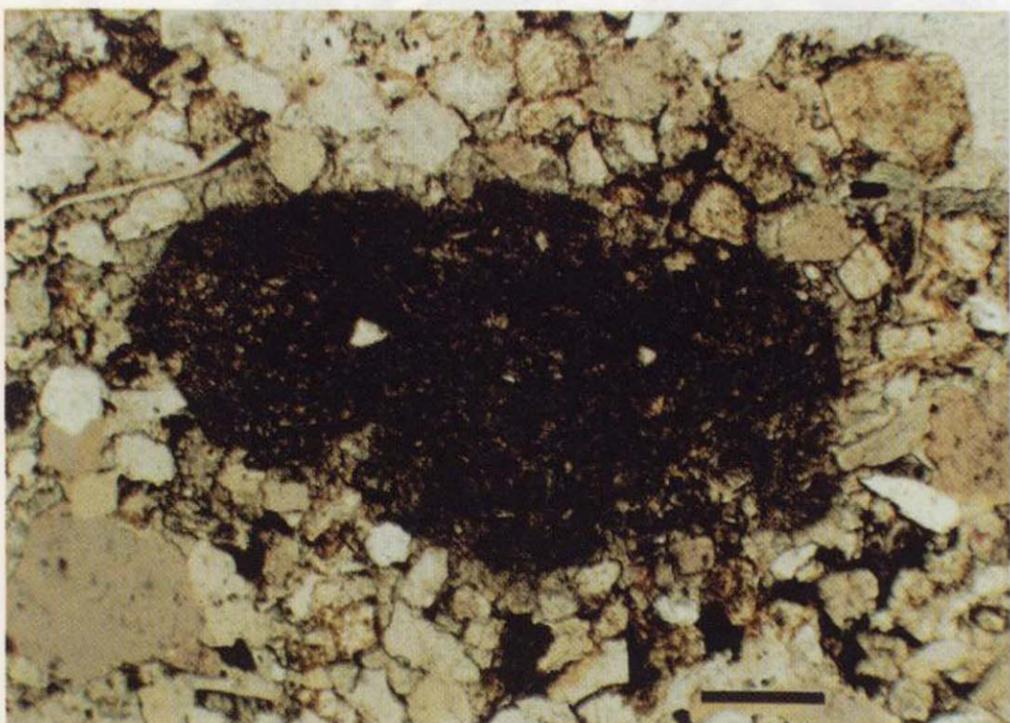
Figura 13.—Diferentes aspectos de los fragmentos pedogenéticos carbonáticos (Cpf). A) Fragmento de rizocreción con núcleo esparítico bien desarrollado (*root zone*) y orla de micrita-limos (*root envelope*), NP, D-199. B) Fragmento de rizocreción con moscovitas en disposición helicoidal alrededor del núcleo micrítico, NP, D-465. C) y D) Nódulo de caliche de composición microesparítica, NP y NC, D-353; y E) micrítica-ox. de Fe., NP, D-353. F) Fragmento pisolítico micrítico (pisolite) con núcleo esparítico, NP, D-616. Escala = 0,5 mm.



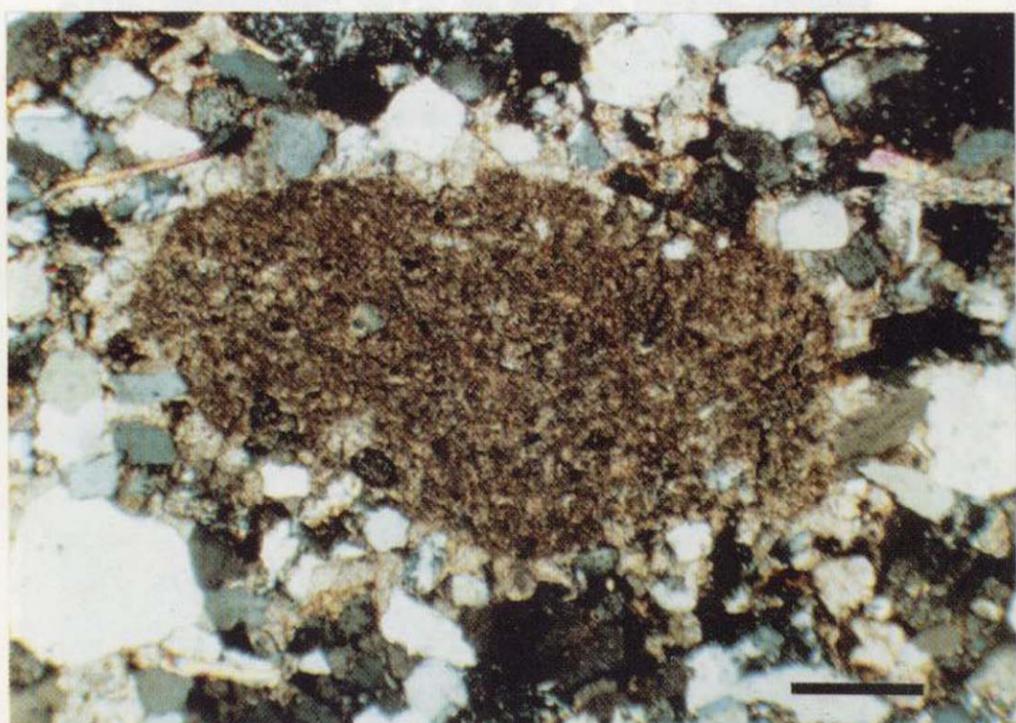
A



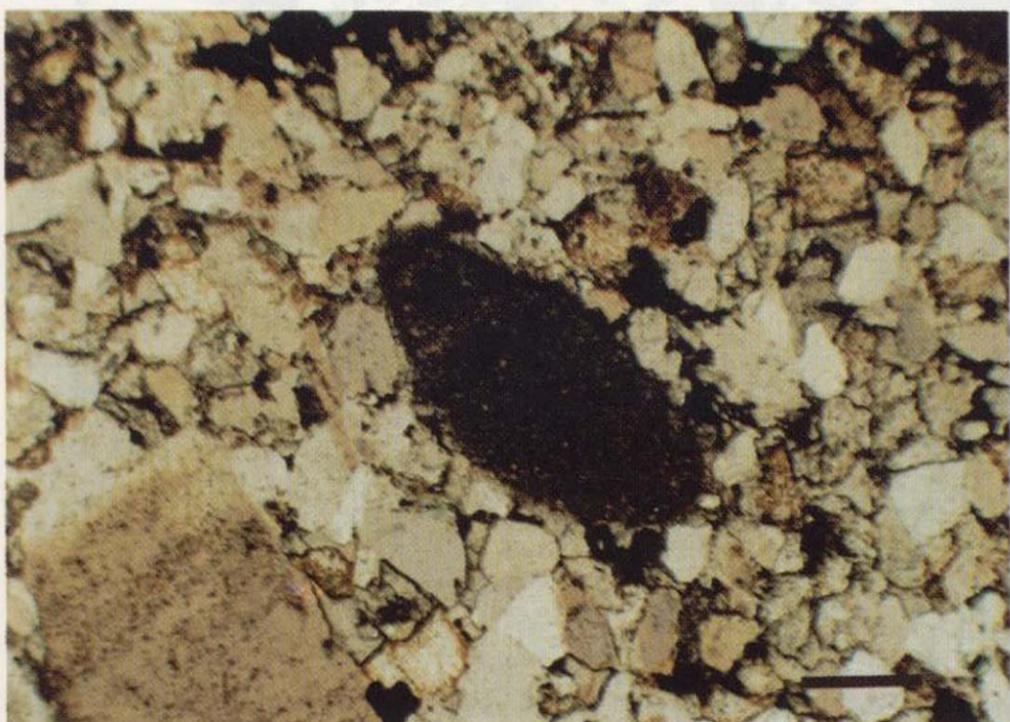
B



C



D



E



F

Figura 13.—Diferentes aspectos de los fragmentos pedogenéticos carbonáticos (Cpf). A) Fragmento de rizocreción con núcleo esparítico bien desarrollado (*root zone*) y orla de micrita-limos (*root envelope*), NP, D-199. B) Fragmento de rizocreción con moscovitas en disposición helicoidal alrededor del núcleo micrítico, NP, D-465. C) y D) Nódulo de caliche de composición microesparítica, NP y NC, D-353; y E) micrítica-ox. de Fe., NP, D-353. F) Fragmento pisolítico micrítico (pisoi-de) con núcleo esparítico, NP, D-616. Escala = 0,5 mm.

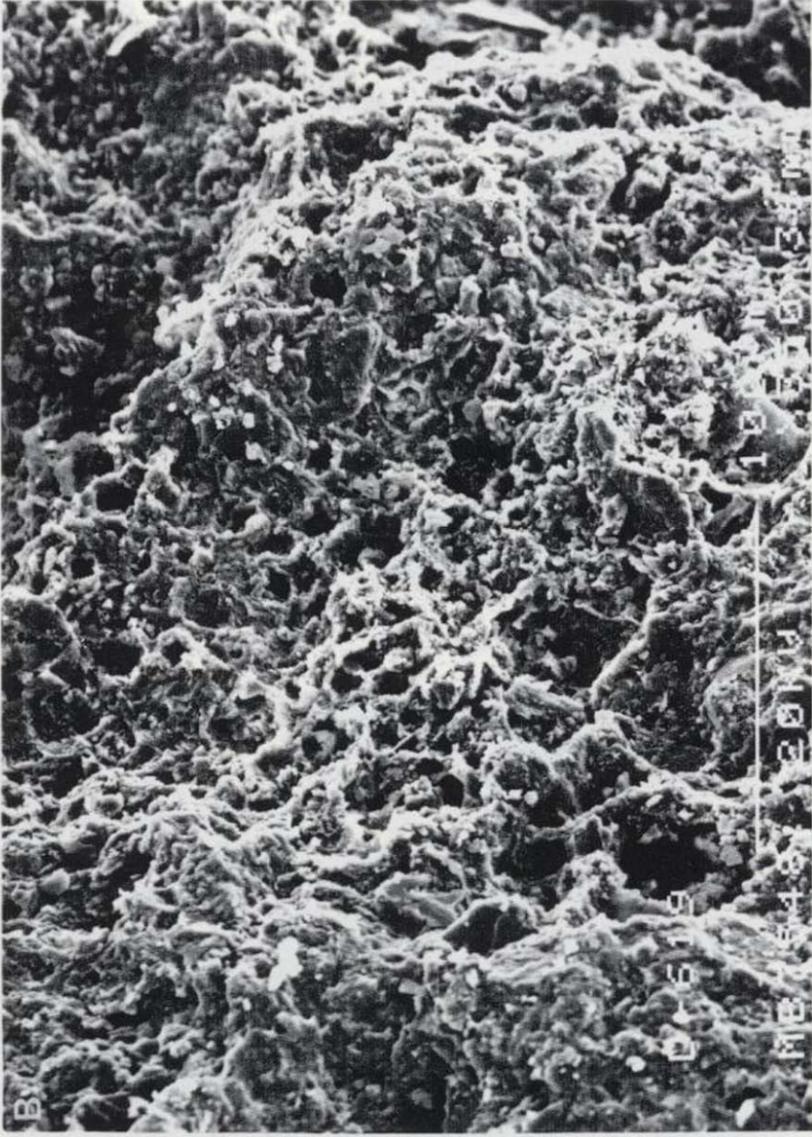
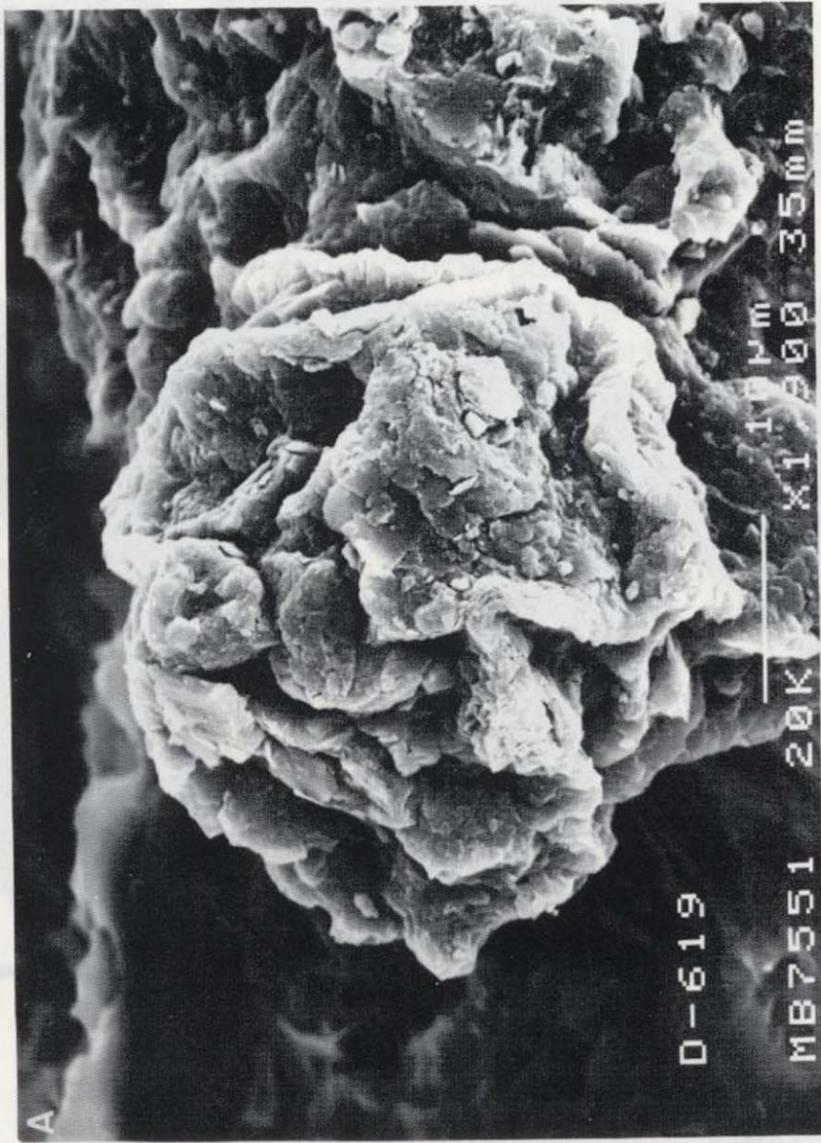
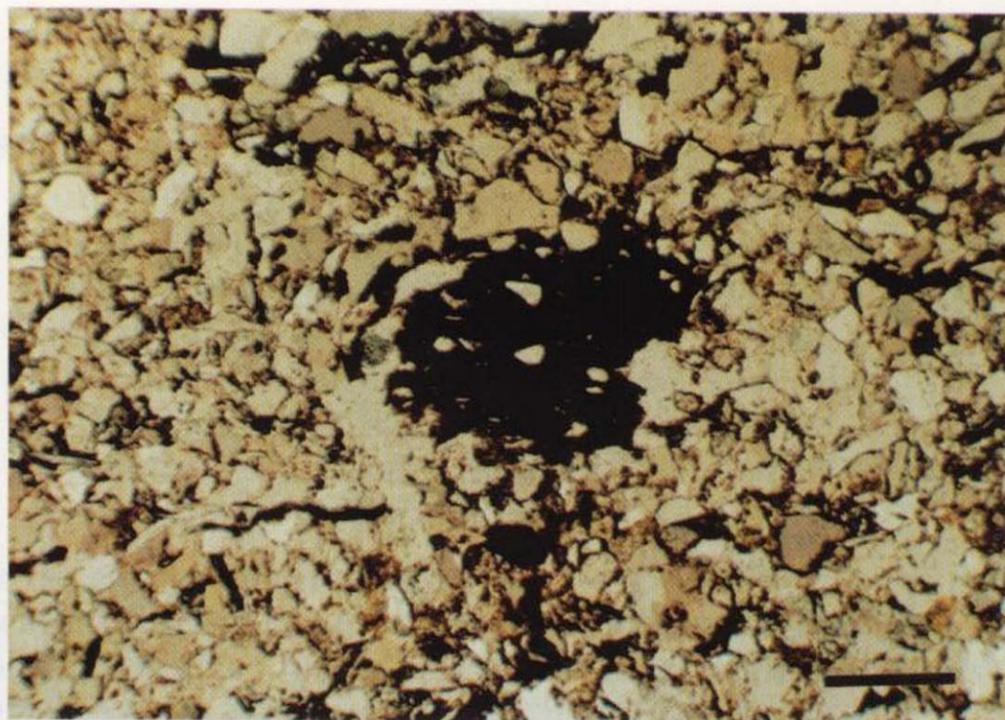
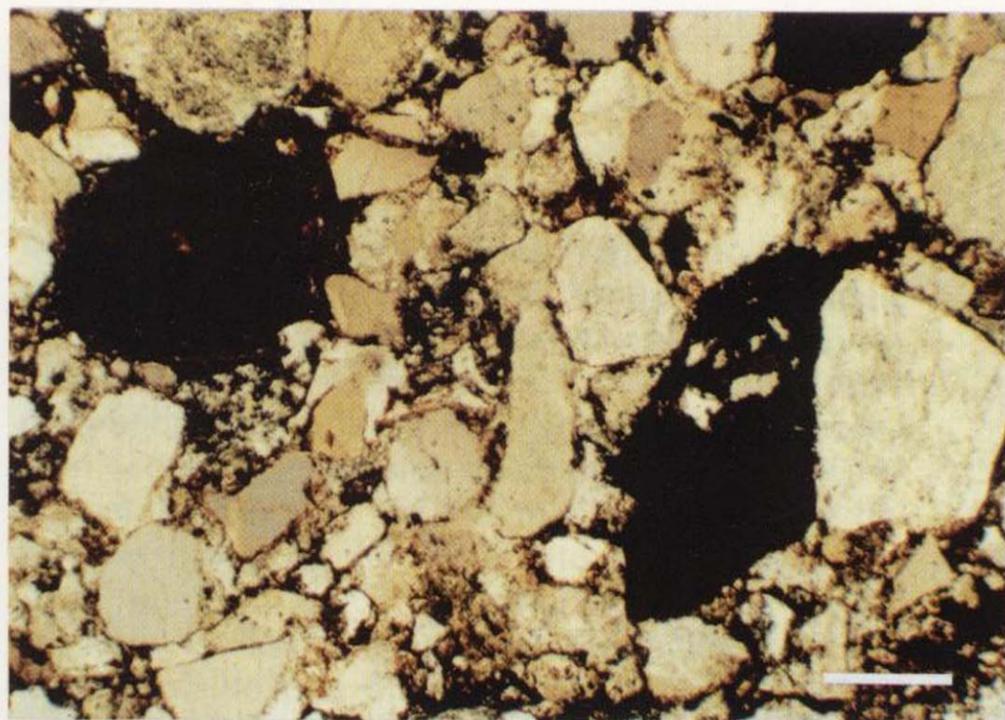
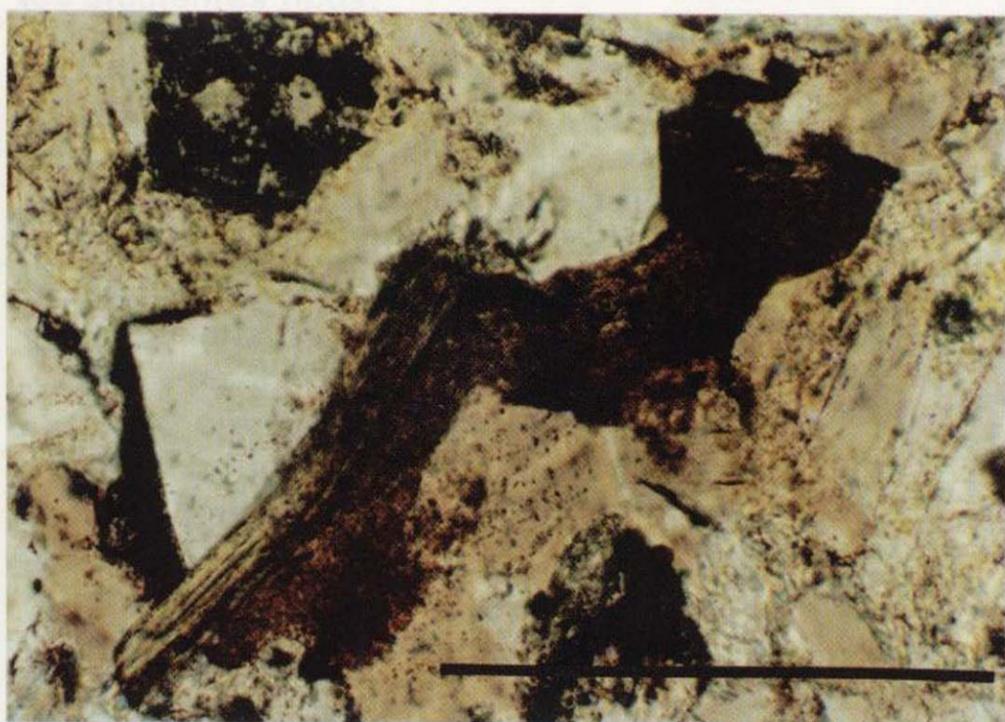


Figura 14.—A) Concreción carbonática orgánica relacionada con paleosuelos. B) Detalle de la estructura porosa de la micrita con coatings de posible origen microbiano. C) Fragmento de costra pedogenética de tipo laminar. D) Detalle de las columnas interlaminares.



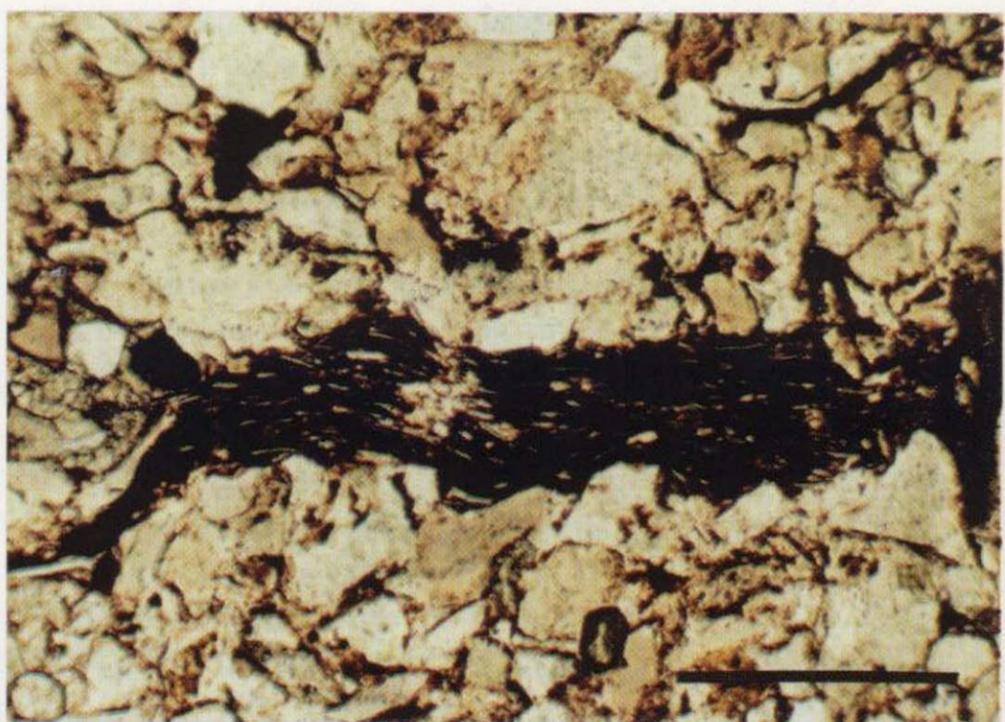
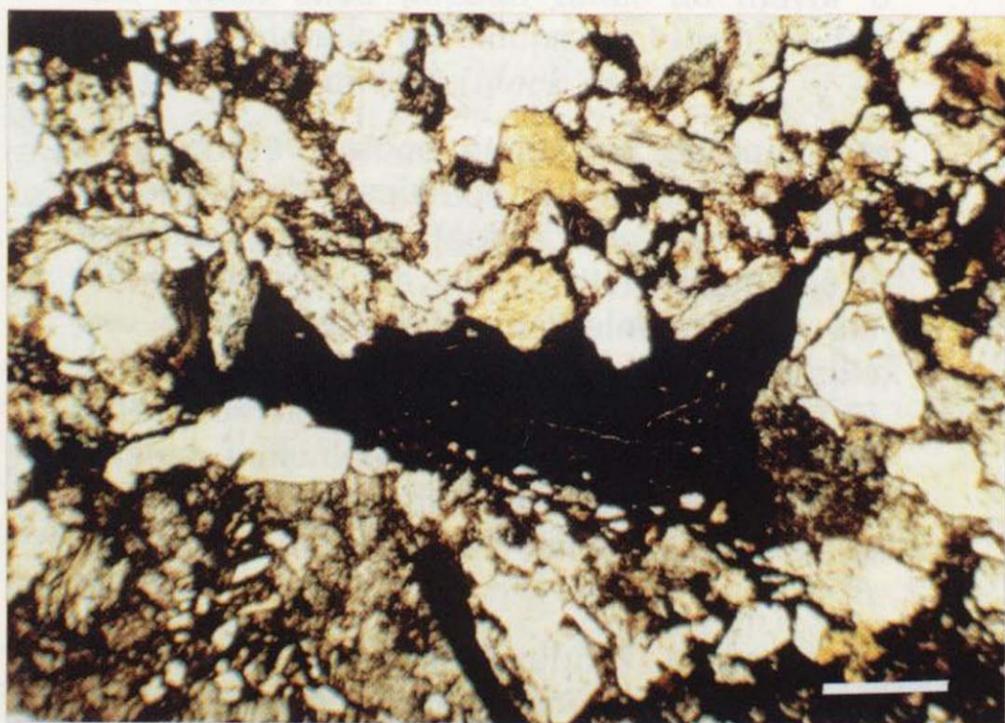
A

B



C

D



E

F

Figura 15.—Diferentes aspectos de los fragmentos pedogenéticos no carbonáticos (Ncpf). A), B) y C) Fragmentos de costras pedogenéticas de tipo ferricretas constituidos fundamentalmente por óxidos de hierro y limos, NP, D-498, D-398 y D-199. C) y D) Cantos blandos de composición arcillosa, NP-NC, D-610, D-616; y F) arcillo-limosa, NP, D-397. Nótese su mayor tamaño con respecto al esqueleto circundante y su deformación plástica debida a la compactación mecánica. Escala=0,05 mm.

Mención aparte merecen los *fragmentos de origen intracuencal*, que aunque tengan contenidos inferiores al 1 por 100 (accesorios), cualitativamente son importantes puesto que dan información sobre el clima y ritmo global de sedimentación (condiciones físico-químicas) en el sistema deposicional. Estos fragmentos, generalmente de tamaño mayor al del esqueleto circundante, poseen un bajo grado de consolidación y en la mayoría de los casos presentan evidencias de haber sufrido una cierta compactación y deformación plástica. Pueden ser de origen pedogenético o no, distinguiéndose en nuestras series los siguientes tipos:

- *Fragmentos pedogenéticos carbonáticos* (Cpf): son todos aquellos procedentes de la erosión de paleosuelos de composición mayoritariamente carbonática (calcretas y dolocretas *sensu* WRIGHT y TUCKER, 1991). En los depósitos residuales procedentes del re-trabajamiento de estos horizontes de calcreta es posible reconocer las diferentes texturas microscópicas descritas por los autores en dicho trabajo, tales como nódulos de caliche (*glabules*) (fig. 13, C, D, E), trozos de rizocreciones (*rhizoliths*) (fig. 13 A, B), fragmentos de suelos de calcreta de los estadios más desarrollados (*laminar calcrete, pisoids, pisoliths*) (fig. 14, 13F), fragmentos de suelos arcillo-limosos carbonáticos, procedentes de la parte superior de los horizontes de calcretas. Todos ellos pueden tener un mayor o menor contenido en óxidos de hierro en forma de recubrimiento (*black pebbles*).
- *Fragmentos pedogenéticos no carbonáticos* (Ncpf): serían aquellos fragmentos de costas pedogenéticas (sobre todo, ferricretas y lateritas) entre los que se distinguen tres tipos constituidos fundamentalmente por óxidos de hierro-*silt*, óxidos de hierro-arcilla, óxidos de hierro-micas-*silt* (fig. 15 A, B, E). Quedan incluidos los litoclastos procedentes del yacente rubefactado y los granos de composición siliciclástica con claras señales edáficas.
- *Fragmentos no pedogenéticos carbonáticos* (Cnspf): serían los fragmentos de huesos de vertebrados (probablemente, reptiles según CALAFAT, 1988).
- *Fragmentos no pedogenéticos no carbonáti-*

cos (Ncnspf): cantos blandos arcillosos o arcillo-limosos (*rip-up-clasts*) constituidos por minerales de arcilla (ilita), cuarzo, micas y feldespato potásico de tamaño limo (fig. 15 C, D). También se incluyen en este grupo los restos de troncos vegetales que generalmente se encuentran carbonizados.

Asimismo, se han reconocido otro tipo de fragmentos que, a veces, exceden el ámbito intracuencal o mejor dicho, que no siempre forman parte estricta de nuestro sistema deposicional, como son los fragmentos procedentes del sustrato meteorizado tanto en el área fuente (costas lateríticas, alteritas, cuarzos con golfos de corrosión) como en la cuenca de sedimentación (yacente subefactado). Estos fragmentos dan información sobre las condiciones físico-químicas (climáticas) en el área fuente y en la cuenca de sedimentación previas al depósito de estos materiales, es decir, son granos no contemporáneos con la secuencia que los contiene, procedentes del saprolito permo-carbonífero.

- La *matriz* de estas areniscas es relativamente escasa (inferior al 15 por 100), aunque puede alcanzar en ocasiones valores de hasta el 20 por 100 por procesos de desagregación de fragmentos de roca y/o por alteración de feldespatos. Se han distinguido dos tipos:
 - a) Matriz filosilicática con mineralogía ílitica y caolinítica fundamentalmente y en menor proporción clorítica, procedente de la alteración y disgregación de feldespatos y fragmentos de roca metamórficos de bajo grado, constituyentes del esqueleto. Forman masas irregulares que rodean al esqueleto y frecuentemente presentan asociados minerales opacos del tipo pirita, ilmenita, jarosita y otros óxidos de hierro. En ocasiones, se pueden observar los contornos de los granos de feldespato precedentes, siendo por lo tanto, equivalente a la epimatriz de DICKINSON (1970).
 - b) Matriz siliciclástica constituida por granos de composición similar a la del esqueleto pero de tamaño inferior a 30 micras (DOTT, 1964; PETTIJOHN et al., 1972).

Existe un tercer tipo muy importante cuantitativamente, que puede superar, en ocasiones, valores de hasta el 13 por 100. Su mineralogía es de caolinita y en menor proporción de ilita. Tex-

turalmente se presentan como *pore filling* de caolinita en abanicos de agregados cristalinos rellenando poros y como *pore lining* de ilita perpendiculares y tangenciales a las superficies de los componentes del esqueleto. En ocasiones, la caolinita se encuentra parcial o totalmente silicificada y dolomitizada.

— Los *cementos*: se han identificado nueve mineralogías diferentes de las cuales seis llegan a ser importantes cuantitativamente, como precipitados químicos en las areniscas. Aparecen como cementos mayoritarios: cuarzo, feldespato potásico, óxidos de hierro, dolomita, calcita y baritina y como minoritarios: dolomita ferrosa, siderita y anhidrita.

El *cemento de cuarzo* aparece siempre como crecimiento sintaxial alrededor de granos de la misma composición, formando cristales subeuhedrales y en raras ocasiones euhedrales, estos últimos ligados a aguas salobres. Su presencia es mucho mayor cuando la serie presenta niveles pelíticos y areniscos intercalados (parte superior de la serie), pudiendo alcanzar valores de hasta el 14 por 100, sólo en este tipo de depósitos. En ocasiones, los cristales de cuarzo muestran corrosiones por minerales de la matriz diagenética (caolinita) y por otros cementos, sobre todo dolomita o calcita.

El *cemento de feldespato potásico* aparece como recubrimiento sintaxial pero sobre los granos de ortosa y microclina. Se trata de cristales subeuhedrales y euhedrales con hábito de adularia (romboidal) con porcentajes que no exceden el 7 por 100 del total de la roca. Al igual que el cuarzo, su contenido aumenta hacia el techo de las series. Suele estar reemplazado por cementos carbonáticos de diferentes composiciones.

El *cemento ferruginoso* es muy constante en toda la serie y su contenido máximo no excede el 18 por 100. Se presenta con dos texturas muy diferentes; o se encuentra rellenando poros y asociado a los componentes intracuncales, o bien aparece como recubrimiento pelicular alrededor de los granos detríticos (*coating* ferruginoso) y no siempre precediendo a los crecimientos sintaxiales.

Los *cementos carbonáticos*, en general, son más abundantes en el techo de las series y

se presentan como grandes cristales poiquilóticos y como cristales aislados de menor tamaño, que cierran la porosidad o reemplazan diferentes granos del esqueleto. La dolomita es el más frecuente de todos, con porcentajes de hasta el 18 por 100. La calcita es importante cuantitativamente (21 por 100), en las series del sector del Montseny e inexistente en los demás sectores. Es frecuente encontrar en este cemento texturas claras de dedolomitización. La dolomita ferrosa y la siderita, por el contrario, no superan nunca valores del 4 por 100, siendo su presencia muy esporádica. En ocasiones, la siderita presenta texturas peletoidales que están siendo reemplazadas por la dolomita ferrosa o dolomita.

La baritina texturalmente aparece con diferentes aspectos: a) en parches rellenando la porosidad residual; b) con texturas poiquilóticas, y c) como cristales aciculares macclados o radiales. Puede alcanzar porcentajes muy elevados (12 por 100 del total de la muestra), pudiendo aparecer en cualquier tramo de las series y no presentando ningún tipo de evolución hacia la base o techo de las mismas. Según CARDELLACH et al. (1990), la precipitación de este cemento de baritina se debería a la mezcla de aguas de origen hidrotermal (fuente del bario), cuyo ascenso se produciría a favor de fracturas profundas de zócalo con otras de origen meteórico o marino (fuente del sulfato).

La baritina también puede tener carácter detrítico y presentar un crecimiento sintaxial o incluso puede encontrarse, en ocasiones, reemplazando a caolinitas. En general, su presencia es muy inconstante a lo largo de las series de la Cordillera Costero Catalana.

El *cemento de anhidrita* es prácticamente inexistente puesto que se encuentra siempre reemplazado total o parcialmente por dolomita. Aparece en formas nodulares dolomitizadas en las que, a veces, todavía en el centro quedan relictos de cristales de anhidrita.

3.4.4. Procedencia

En este apartado se abordarán los aspectos referentes a la composición, relieve, clima y am-

biente tectónico que reinaban en el área fuente desde un punto de vista meramente petrográfico. La finalidad de este análisis es aportar un criterio más, que sea de utilidad para intentar la reconstrucción paleogeográfica final.

De los datos comentados en los anteriores apartados se deduce que cuando el ambiente de sedimentación es aluvial de tipo trenzado, los depósitos son maduros tanto textural como composicionalmente, y evolucionan hacia el techo a una mayor madurez composicional. En cambio, cuando el ambiente es de tipo meandriforme, los depósitos son muy homogéneos a lo largo de la serie, siendo menos maduros en su textura y composición (subarcosas). El ambiente de sedimentación de tipo trenzado está bien representado en las series de los sectores de Garraf y Prades y prácticamente es inexistente en el sector del Montseny. Al contrario ocurre con los afloramientos de facies meandriformes, ya que afloran ampliamente en el sector del Montseny, con menor espesor en el de Garraf, y poseen una potencia muy reducida en el sector de Prades. En las series en que coexisten los dos (sector de Garraf) siempre el ambiente de tipo trenzado se encuentra «solapado» por el sistema meandriforme. Debido a las diferencias en sus características petrográficas, de facies, y a su distinta distribución areal se tratarán siempre por separado.

En los depósitos aluviales de tipo trenzado la abundancia de cuarzo policristalino y sobre todo su asociación con los fragmentos de roca implica un predominio de áreas fuentes metamórficas y en menor grado plutónicas, sedimentarias y volcánicas (bajo contenido en Fk). Siguiendo los criterios de DICKINSON et al (1983), corresponderían a depósitos de áreas geotectónicas de orógenos reciclados (fig. 16), donde la existencia de fragmentos de *chert*, de rocas detríticas de grano fino y limolítico y de cuarzo policristalino, resalta la presencia de litologías meta-sedimentarias y volcánicas ácidas en el área fuente. Todas estas variedades litológicas se hallan ampliamente representadas en los materiales prehercínicos de la Cordillera Costero Catalana (JULIVERT y DURAN, 1990). Por el contrario, en los depósitos de tipo meandriforme, la gran abundancia de cuarzo monocristalino y feldespato potásico en asociación con fragmentos de roca plutónicos, es reflejo del influjo

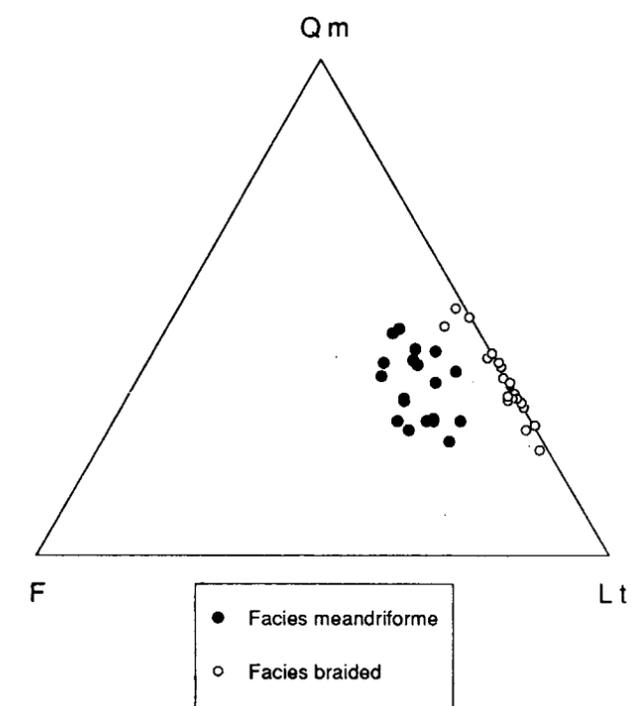


Figura 16.—Proyección de las areniscas de la Cordillera Costero Catalana en un diagrama Qm-F-Lt de DICKINSON et al. (1983).

directo de áreas fuente granítico-gneísicas, que serían dominantes con respecto a las metamórficas. En el diagrama de DICKINSON et al (1983) estos depósitos quedan bien individualizados de los anteriores, al caer proyectados en el campo de los ambientes geotectónicos ligados a arcos magmáticos, pero en estrecha relación con los orógenos reciclados (fig. 16). Este tipo de depósitos tendrían sus áreas fuente en el sector del Montseny donde los granitoides epizonales, post-tectónicos de edad Carbonífero Superior-Pérmico intruyeron ampliamente a los materiales prehercínicos después de la fase de plegamiento hercínico, produciéndoles un metamorfismo de contacto (ENRIQUE, 1990). Según dicho autor, este magmatismo de serie calcoalcalina es similar, en parte, a los magmas de arcos volcánicos y en parte a los de post-colisión, por lo que debe haberse formado por encima de una litosfera oceánica en subducción y tendrían un emplazamiento de alto nivel.

Al aplicar a los depósitos estudiados el diagrama Qm-P-K propuesto por DICKINSON et al.

(1983) (fig. 17) se desprende que el bajo contenido en plagioclasa (inferior al 1 por 100) y el alto grado de alteración que presenta, serían indicadores de un clima húmedo en el área fuente, que acentuaría la relación P/K. Según BASU (1976), para áreas muy húmedas el valor de esta relación puede ser un tercio del valor que presenta en las rocas plutónicas de las que proceden.

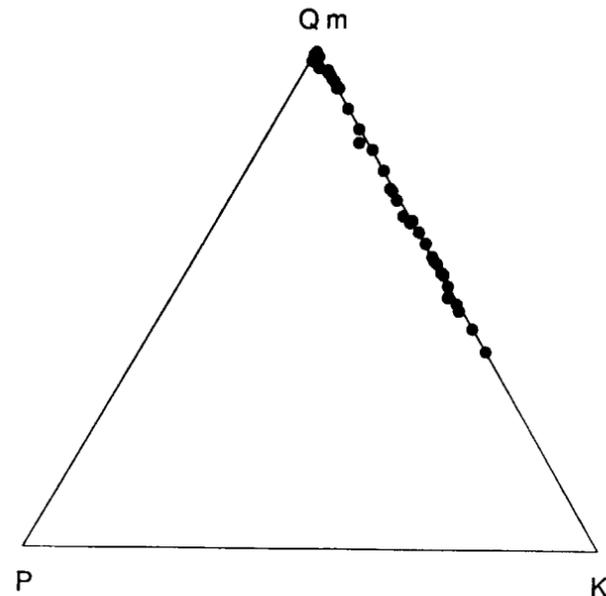


Figura 17.—Proyección de las areniscas de la Cordillera Costero Catalana en un diagrama Qm-P-K de DICKINSON et al. (1983).

Representando en un diagrama triangular los fragmentos de roca de tipo metamórfico, plutónico y sedimentario (fig. 18) se observa claramente que los sedimentos de facies meandriformes presentan un mayor contenido en fragmentos plutónicos que los de facies aluviales de tipo trenzado. Este hecho apoyaría la idea de que en el momento en que actúan las áreas fuentes de los sistemas meandriformes, se halla mucho más representado este tipo de rocas (macizo del Montseny y sierra de Miramar).

3.4.5. Meteorización y diagénesis

3.4.5.1. Introducción

En este apartado se estudiarán los procesos edá-

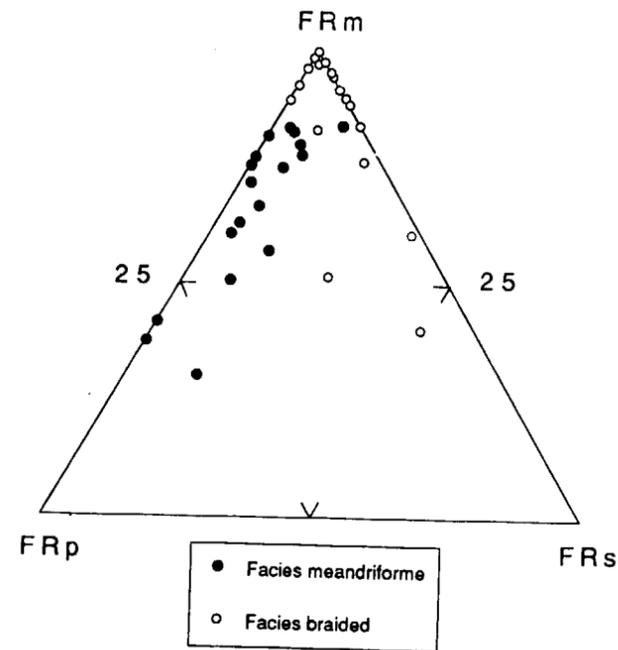


Figura 18.—Proyección triangular de los fragmentos de roca metamórficos, plutónicos y sedimentarios constituyentes del esqueleto de las areniscas de la Cordillera Costero Catalana.

ficos y diagenéticos que afectan tanto a los sedimentos permotriásicos del área de estudio como a las rocas que constituyen el área fuente y substrato de las series. En primer lugar se analizarán estos últimos, es decir, aquellos procesos de alteración que ocurrieron en el relieve existente con antelación a la sedimentación permotriásica (puesto que influirán de manera decisiva en algunos de los procesos post-sedimentarios). En segundo lugar, se estudiará la historia diagenética de los depósitos, con la finalidad de conocer más detalles sobre la evolución de la cuenca permotriásica, que ayuden en la reconstrucción paleogeográfica final.

3.4.5.2. Procesos que actúan en el área fuente

A partir de la exhumación general del relieve hercínico durante el Carbonífero Superior, se inicia un período en el que el clima y la tectónica juegan un papel importante en la modelación de las futuras cuencas paleogeográficas permotriásicas. Se entiende como cuenca paleogeográfica el área en que se produce la erosión

de los materiales (cuenca de erosión), el área de *by pass* de los sedimentos (cuenca de transporte) y finalmente, el área donde éstos vayan a parar y se depositan (cuenca de sedimentación). Así pues, la acepción de cuenca paleogeográfica utilizada en este trabajo, engloba, en un único término, la concepción morfológica, la tectónica y la de sedimentación.

El relieve post-hercínico, es decir, las rocas aflorantes sobre las que se instalaría la cuenca paleogeográfica y que constituirían el área fuente o substrato de los depósitos permotriásicos, estuvieron expuestas a los efectos de una alteración climática, que provocaría la creación de un horizonte de meteorización. Este horizonte, también llamado de rubefacción, se situaría por debajo de la discordancia angular, que pone en contacto el Paleozoico con el Permotriás y ha sido estudiado con antelación por VIRGILI et al. (1974); VIRGILI (1977) y detalladamente por MARZO (1980) Estos autores ya afirmaron que dicha rubefacción posee una penetración variable entre 0,5 y 50 m de profundidad (dependiendo de la litología del substrato), que es debida a la acción de un clima húmedo tropical con una estación seca, y que la edad de desarrollo de la misma es Pérmico Superior y/o Triásico Inferior. Las repercusiones de este tipo de clima sobre las diferentes litologías ya han sido ampliamente indicadas por estos autores y se pueden concretar en: la hidrólisis de las plagioclasas y ferromagnesianos durante la estación húmeda con la fijación del hierro liberado, y la precipitación de caolinita e illita durante la estación seca, dejando prácticamente intactos los feldespatos alcalinos y el cuarzo.

Los estudios realizados con motivo de este trabajo sobre la petrología de los depósitos permotriásicos confirman la mayoría de los resultados y conclusiones obtenidos por estos autores sobre la rubefacción, exceptuando lo referente a la edad del fenómeno. En primer lugar, los efectos del mismo se hallan ampliamente representados en el contacto Paleozoico-Pérmico de la isla de Menorca. Y en segundo lugar, es más fácil pensar que este fenómeno tuvo lugar desde el Estefaniense hasta la transgresión del Triásico Inferior que no limitarlo al tránsito entre estas dos eras. Además, en aquellos lugares en que esta rubefacción es muy pequeña o inexistente, con gran probabilidad o se ha erosionado parcial

o totalmente, o simplemente no ha tenido el tiempo suficiente para desarrollarse. Durante el Pérmico, en aquellas áreas en que existía sedimentación, estos procesos de alteración afectaban a los sedimentos y en aquellas áreas que no formaban parte de la cuenca de sedimentación, la rubefacción era muy intensa. Posteriormente, este horizonte de rubefacción, en un estado de mayor o menor desarrollo, será trastocado por efecto de la tectónica distensiva que, en algunos casos, facilitará su erosión y en otros su preservación.

Por tanto, a la actuación del clima durante este período le debemos la creación del gran potencial volumétrico de sedimentos que durante el Pérmico y el Triásico Inferior serán erosionados, transportados y sedimentados, fundamentalmente en forma de abanicos aluviales.

No obstante, en algunas cuestiones de detalle existen pequeñas discrepancias, tal como si en dichos perfiles se llegó o no a alcanzar la formación de suelos lateríticos (MILLOT, 1964). Sin embargo, existen fragmentos como representantes del esqueleto de las areniscas en forma de fragmentos ferruginosos muy caoliníticos en proporción variable, que atestiguan su existencia. Estos fragmentos, junto con los intracuencales, juegan un papel significativo en la diagénesis de los sedimentos permotriásicos.

En este tipo de suelos y sobre los granos de cuarzo y otros silicatos se produce una meteorización química intensa que provoca la formación de golfos de corrosión y un redondeamiento general (*embayed quartz grains*, CLEARY y CONOLLY, 1972), que puede ser más efectiva que la abrasión mecánica y que explicaría el origen de muchas arenas supermaduras bajo climas tropicales (CROOK, 1968; POTTER, 1978; JHONSON et al., 1988). Esto ayudaría a explicar la extrema redondez de los cantos, observada en la mayoría de los depósitos conglomeráticos basales y en diferentes niveles de la facies *braided*, así como su composición cuarzosa, prácticamente oligomictica. Este hecho tendría lugar ya en el área fuente, puesto que éste se nutre directamente del saprolito permo-carbonífero.

El hierro liberado en la alteración de los ferromagnesianos de la roca original pasará mayoritariamente a formar parte de los suelos ferruginosos lateríticos y, en menor proporción, cau-

sará el recubrimiento pelicular en forma de *coating* ferruginoso sobre los granos del esqueleto en el área fuente, durante el transporte y posteriormente en la cuenca de sedimentación, como un proceso penecontemporáneo (HARWOOD, 1988).

3.4.5.3. Procesos que afectan a los sedimentos

Una vez que los detritos han quedado depositados en la cuenca de sedimentación, comienzan a actuar los procesos diagenéticos.

En general, podemos distinguir dos ambientes diagenéticos claramente diferentes: uno ligado a la acción de las aguas continentales y otro debido a la influencia de las aguas marinas procedentes de la transgresión del Tethys. El primero tendrá mayor desarrollo en la parte inferior de las series detríticas permotriásicas y el segundo, paulatinamente, se irá implantando hacia el techo de las mismas. Existe un tercer ambiente diagenético debido a la acción de las aguas salobres típicas de *sabkhas*, con muy poco desarrollo y limitado al contacto con las facies marinas del Muschelkalk Inferior.

La cuantificación de la mineralogía autigénica ya ha sido abordada en el apartado de descripción de los componentes, siendo por tanto, el motivo central de este capítulo la reconstrucción del quimismo de las aguas intersticiales, su relación con el ambiente de sedimentación, así como su evolución durante el enterramiento diagenético y su posterior emersión, a partir del estudio de los diferentes procesos diagenéticos.

3.4.5.3.1. Diagénesis por aguas meteóricas

Los procesos edafo-diagenéticos más comunes que se desarrollan en las primeras etapas de la sedimentación permotriásica están íntimamente relacionados con los que se producen en el área fuente de los mismos, ya comentados con anterioridad. Estos procesos se deben a la acción directa de las aguas meteóricas, que provocarán fenómenos de alteración disolución y autigénesis en los diferentes componentes del sedimento. Según la terminología de HARWOOD (1988) y atendiendo a las relaciones texturales que guardan entre ellos, se han podido distinguir cuatro etapas en las que se fueron sucediendo estos procesos, consistiendo éstos, fundamentalmente en los siguientes:

- Durante la diagénesis penecontemporánea:
 - a) Formación del *coating* ferruginoso; éste precipitaría de forma pelicular sobre los granos del esqueleto a partir de las aguas meteóricas ricas en hierro por la hidrólisis de los ferromagnesianos. Este recubrimiento pelicular, que puede ir acompañado de una corrosión superficial sobre los granos de cuarzo (cuarzos edafizados), comenzaría a producirse en el área fuente y proseguiría durante el transporte-sedimentación de estos materiales detríticos. En la cuenca de sedimentación, parte de este hierro será uno de los constituyentes principales de ciertas costras edáficas, cuyo retrabajamiento posterior creará algunos de los distintos tipos de fragmentos intracuencales.
 - b) «Clay coat» arcillo-ferruginosos, generados por procesos de infiltración, relacionados con variaciones del nivel freático y/o bioturbación (MATLACK et al., 1989).
- Durante la eodiagénesis y en aguas conectadas con el ambiente continental fluvial:
 - c) Formación de caolinita como epimatriz y como *pore filling*.
 - d) Reemplazamiento de moscovita e illita por caolinita.
 - e) Neoformación de rombos dispersos o en agregados de siderita relacionados con la materia orgánica, dando mosaicos que cierran casi totalmente la porosidad.
- Durante la mesodiagénesis:
 - f) Precipitación de cemento sintaxial de cuarzo. La sílice procedería de la disolución del cuarzo y de los feldespatos, sobre todo plagioclasas, representadas ampliamente en las áreas fuentes cristalinas post-hercínicas. En menor medida, estas plagioclasas aparecen en la serie metasedimentaria carbonífera y en la ígnea y metamórfica pre-carbonífera, siendo inexistentes en los horizontes rubefactados que actúan sobre estas litologías. En general, el contenido en cemento silíceo presenta porcentajes bajos (0,2-0,5 por 100) en la base de la serie permotriásica y va aumentando hacia el techo de la misma, alcanzando valores del 5-10 por 100 por término medio.

- g) Precipitación de cemento ferruginoso producto de la removilización del hierro procedente fundamentalmente, de los fragmentos intra y extracuencales y en menor medida, de algún ferromagnesiano, ya alterado en el área fuente. Esta removilización tendrá lugar mayoritariamente, durante la fase de compactación mecánica, pudiendo llegar a ser este cemento, porcentualmente muy importante (15 por 100).
- h) Cemento sintaxial de cuarzo, cuantitativamente menos importante que el de la etapa anterior.
 - i) Disolución parcial del feldespato potásico.
 - j) Reemplazamiento de caolinita por illita.

3.4.5.3.2. Diagénesis con influencia de aguas marinas

La influencia de este ambiente diagenético empieza a notarse durante la eodiagénesis y se desarrolla fundamentalmente, en la parte superior de la serie permotriásica debido a la mezcla de aguas continentales y aguas marinas que conlleva la transgresión del Triásico Inferior. Por lo tanto, de base a techo de cada una de las columnas estratigráficas, tendremos un cambio paulatino de un ambiente diagenético al otro, aunque existan columnas que por su posición estratigráfica, mayoritariamente sólo han registrado uno de los dos. Durante esta etapa diagenética los procesos que se desarrollan son los siguientes:

- a) Precipitación de cemento sintaxial de feldespato potásico.
 - b) Neofórmación de piritita.
 - c) Neofórmación de illita fibrosa que puede continuar a lo largo de la mesodiagénesis.
- Durante la mesodiagénesis:
- d) Precipitación de cemento sintaxial de cuarzo.
 - e) Removilización del hierro con la compactación mecánica y precipitación de cemento ferruginoso de manera análoga al anterior ambiente diagenético.
 - f) Precipitación de anhidrita y baritina de origen termal o marino, apareciendo esta última con porcentajes accesorios hacia el techo de las series.

- g) Precipitación de carbonatos, fundamentalmente dolomítico, reemplazando incluso a cualquier componente del sedimento.

Por último, durante la mesodiagénesis o principio de la telodiagénesis y a favor de la nueva entrada de aguas meteóricas se producirá la corrosión y dedolomitización de los diferentes cementos y granos del esqueleto y la precipitación de grandes caolinitas-dickitas (DE LA CRUZ et al., 1987) en forma de *pore filling*.

3.4.5.3.3. Diagénesis por aguas salobres

Este ambiente diagenético sólo se desarrollará en el techo de las series permotriásicas, en aquellos niveles arenosos ya muy cercanos al contacto con el Muschelkalk Inferior. Durante la diagénesis penecontemporánea y en un ambiente deposicional de tipo *sabka* o de lagunas costeras, se producen los siguientes procesos:

- a) Formación de concreciones peletoidales de materia orgánica filamentosa de tipo algal rellenando porosidad inicial y asociada a caolinita o a carbonatos sideríticos.
- Durante la eodiagénesis:
- b) Precipitación de cementos tempranos de calcita que inhibirán los procesos de compactación mecánica durante la mesodiagénesis.
 - c) Autigénesis de feldespato potásico sintaxial.
 - d) Autigénesis de cuarzo euhedral con inclusiones de evaporitas.
 - e) Precipitación de baritina y anhidrita relacionada con la materia orgánica estromatolítica (MARFIL y GOMEZ-GRAS, 1990).
- Durante la mesodiagénesis:
- f) Dolomitización de los cementos anteriores.
- Durante la telodiagénesis:
- g) Yesificación de la anhidrita.

3.4.5.4. El color rojo

El origen del color rojo de las rocas detríticas ha sido y será una de las controversias mayores de la sedimentología. En el transcurso de los cien últimos años han sido propuestas numerosas interpretaciones, que centran en dos los fenómenos esenciales que intervienen en la formación del color rojo de las rocas detríticas:

uno, el clima en el área fuente y en el ambiente de sedimentación de estas rocas, y otro el origen y el tipo de formación del pigmento rojo (GAMERMANN, 1979). Este autor realiza un amplio y exhaustivo examen bibliográfico que sintetiza en su tesis doctoral. En este trabajo llega a la conclusión, inspirado en los estudios de WALKER (1976), de que el color rojo es debido a un pigmento, la hematites. Esta proviene de minerales ricos en hierro (biotita, magnetita, ilmenita, granate), que durante las etapas tempranas de la diagénesis se difunden entre los granos vecinos envolviéndoles en una película roja, y por lo tanto la coloración es independiente del clima existente en el área fuente y en el ambiente de sedimentación.

Las opiniones que sobre esta problemática se apuntan en los trabajos más recientes (BURLEY et al., 1985; BURLEY y KANTOROWICZ, 1986) van en este mismo sentido. Por lo tanto, parece generalizada la idea de atribuir el color rojo de las rocas detríticas a un origen diagenético.

Nosotros pensamos, que esta coloración rojiza está íntimamente relacionada con el clima existente en la cuenca paleogeográfica. Un clima cálido y húmedo desarrollaría la rubefacción del substrato sobre el que se instalará el sistema área fuente-cuenca de sedimentación como se ha comentado en el apartado correspondiente. Un clima árido favorecería la formación de costras pedogenéticas de tipo ferruginoso en el sistema deposicional. Todo este tipo de costras pedogenéticas serán erosionadas dando fragmentos intra y extracuencales como los descritos en anteriores capítulos. La precipitación de cemento ferruginoso de tipo hematites está íntimamente relacionada con la removilización del hierro que se produce al comienzo de la mesodiagénesis a partir de estos fragmentos.

* * *

Concluyendo, la génesis del color rojo se relaciona con la hematites que procede en mayor medida de los fragmentos intra y extracuencales pedogenéticos y en menor proporción del «*coating*» ferruginoso-arcilloso que precipita en la etapa penecontemporánea. Por tanto, el ciclo del hierro comenzaría con la meteorización del substrato hercínico bajo un clima húmedo tropical. Esta acción se traduciría en la hidrólisis de los ferromagnesianos, en la que el hierro liberado

pasaría parcialmente a formar parte de suelos lateríticos muy caoliníticos en la misma área fuente y en parte, sería transportado por las aguas meteóricas hacia la cuenca de sedimentación. Ya en el ambiente deposicional y bajo un clima árido el hierro será el constituyente fundamental de las costras pedogenéticas y además, precipitará en forma de pátina alrededor de los granos del esqueleto. Más tarde, debido a la compactación mecánica que tiene lugar durante la etapa mesodiagenética inmadura de SCHMIDT y McDONALD (1979), se producirá la última removilización del hierro a favor, fundamentalmente, de los fragmentos pedogenéticos intra y extracuencales y en menor medida de algún ferromagnesiano superviviente.

Durante la telodiagénesis también hay migración de óxidos de hierro que son los que formarían el punteado típico del Buntsandstein (siderita más o menos oxidada y dedolomitización de la dolomita) y los anillos de Liesegans que con frecuencia dan una pseudolaminación cruzada.

3.5. TECTONICA-SEDIMENTACION

3.5.1. Introducción

Como síntesis de los capítulos anteriores, y con el propósito de integrar los datos elaborados hasta el momento, cabe el intento de realizar un análisis de la cuenca sedimentaria durante el Pérmico terminal y comienzos del Triásico, teniendo en cuenta, principalmente, el momento tectónico-sedimentario y su evolución espacial y temporal.

La transición histórica entre la concepción de un modelo clásico, elaborado en los trabajos de LLOPIS (1947) y VIRGILI (1958), principalmente, y el modelo propuesto como síntesis en este estudio, debe buscarse en el esbozo de cuenca realizado por ANADON et al. (1979). Estos autores, en base a las características estratigráficas y sedimentológicas de las series, dividen la cuenca en «dominios». El límite entre estos dominios se efectúa mediante líneas de fractura de zócalo transversales a la alineación tectónica, que manifiesta el estado actual de la geología. Algunas de estas fracturas eran ya conocidas desde LLOPIS (1947), aunque su verdadera influencia en la configuración de la cuenca sedimentaria fini-pérmica y del comienzo del Triásico

(y quizá también, del Jurásico y Cretácico Inferior) era completamente desconocida.

3.5.2. Modelo tecto-sedimentario

El modelo de evolución sedimentaria de la cuenca del Buntsandstein catalánide propuesto, es consecuencia por un lado, de un análisis crítico y sintético de la bibliografía más importante que ha podido consultarse sobre este tema concreto y, por otro, del análisis y síntesis de los datos geológicos descritos en los capítulos anteriores, con una integración final de los datos bibliográficos y las observaciones de campo y laboratorio.

En los trabajos realizados durante la última década sobre tectónica extensional se pone de manifiesto que los procesos de extensión litosférica están caracterizados por el distinto desarrollo de bloques basculados y semigrabens, limitados por fallas normales de grandes dimensiones. Estas fallas pueden ser de dos tipos: planares o lístricas, siendo estas últimas las más frecuentes (WERNICKE y BURCHFIEL, 1982; GIBBS, 1984; ROSENDAHL et al., 1986; ROSENDAHL, 1987; ELLIS y McCLAY, 1988). Son muy pocos los trabajos que ahondan en la relación tectónica-sedimentación en cuencas distensivas (LEEDER y GAWTHORPE, 1987; ALEXANDER y LEEDER, 1987; FROSTICK y REID, 1987; LEEDER y ALEXANDER, 1987) y prácticamente inexistentes aquellos que versan sobre sedimentos antiguos (SCOTT y ROSENDAHL, 1989; HAMBLIN y RUST, 1989).

El modelo bibliográfico que en gran parte se adopta en este trabajo representa la convergencia de dos líneas diferentes de estudio: en la primera se aborda el problema tectónico-geométrico y en la segunda el control tectónico en el funcionamiento sedimentológico y, como consecuencia, en la estratigrafía.

El tectónico-geométrico tiene su punto de partida en el estudio de los grandes *rifts* africanos. ROSENDAHL et al. (1986) definen un modelo de *rifting* asimétrico en el que las fallas de grandes dimensiones aparecen en un solo margen. Estas fallas son curvas tanto en planta como en sección y se extienden a lo largo de una zona de *rift* de manera sinusoidal alternante (fig. 19b). Estos autores consideran como unidad fundamental que se repite en una gran cuenca *rift*, el semigraben. Un semigraben (fig. 19a) está limi-

tado por el borde de la falla lístrica principal, al pie de la cual se sitúa el depocentro, prácticamente durante toda la etapa de relleno, y hacia el otro extremo, se atenúa de forma progresiva, mediante un sistema escalonado originado por las fallas antitéticas. Mientras la geometría en planta es prácticamente invariable, en sección puede tener diferentes acepciones, según sea el funcionamiento de las fallas (fig. 20). Las características geométricas dadas por estos autores constituyen la base del modelo de cuenca aplicado al Buntsandstein de los Catalánides.

Geoméricamente, en las fracturas que afectan a un semigraben pueden diferenciarse dos zonas

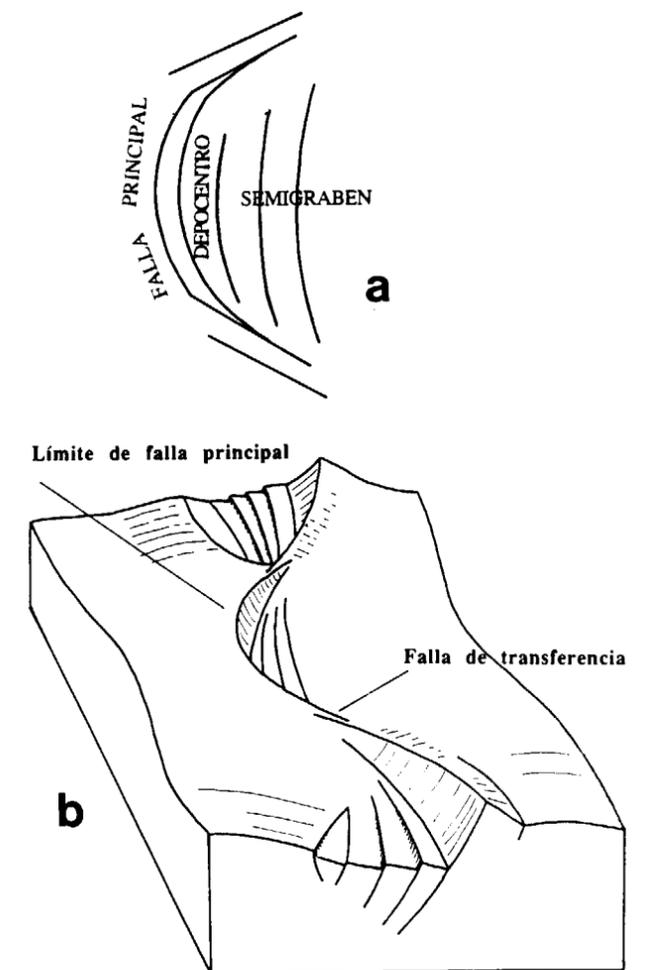


Figura 19.—a) Bloque diagrama mostrando la posición y orientación de semigrabens en relación a las fracturas y al desarrollo de cuencas sedimentarias. b) Principales características de una unidad fundamental o semigraben (modificado de ROSENDAHL et al., 1986).

(fig. 21): la zona del bloque superior (*hanging wall*) afectada por una subsidencia de tipo asimétrico, que desarrollará una pendiente suave hacia la falla y la zona del bloque inferior (*foot-wall*) sometida a un levantamiento relativo y caracterizada por un abrupto escarpe de falla. La zona del bloque inferior constituirá la principal fuente de sedimento para la cuenca, aunque debido a la naturaleza asimétrica de la misma, el sedimento procedente de la zona del bloque su-

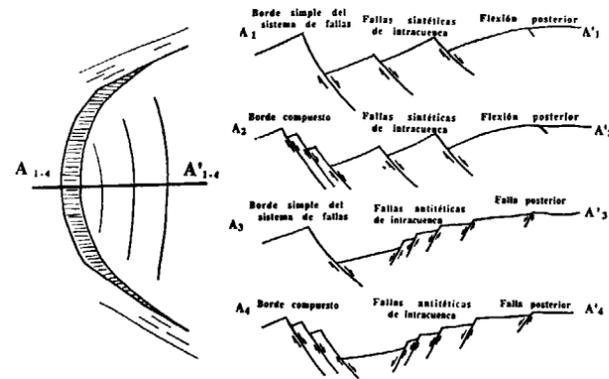


Figura 20.—Variedad de morfologías observadas en corte a lo largo de A-A' (modificado de ROSENDAHL et al., 1986).

perior puede ser extensivamente mucho más importante (LEEDER y GAWTHORPE, 1987). Probablemente, no se trata de una sola falla la que actúa como límite de los semigrabens, que han originado las cuencas en estudio, sino que se trataría de un sistema de fallas listricas imbricadas (*listric fan*) que irían rejuveneciendo el escarpe del bloque inferior (*footwall scarp*) y marcarían el carácter retrogradante de las series depositadas en forma de abanicos aluviales de facies de cursos trenzados.

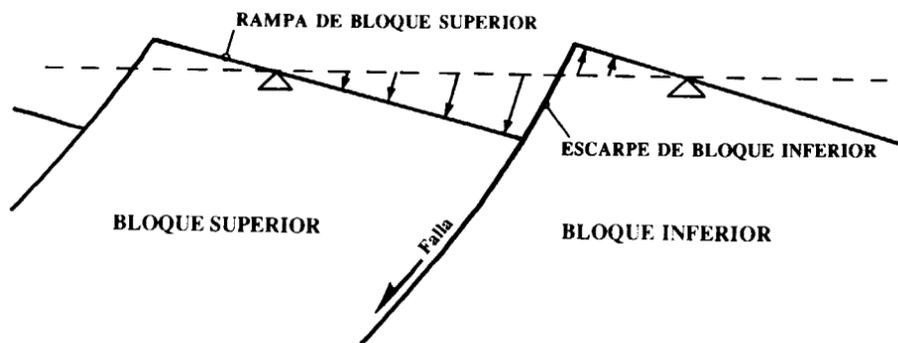


Figura 21.—Geometría y nomenclatura de un bloque basculado de un semigraben. Las flechas indican la magnitud del desplazamiento y los triángulos el desplazamiento cero (modificado de LEEDER y GAWTHORPE, 1987).

La idea del control ejercido por la tectónica sobre la sedimentación y más concretamente sobre la arquitectura aluvial que caracteriza el relleno de este tipo de cuencas, es abordado por ALEXANDER y LEEDER (1987) y ampliamente por LEEDER y GAWTHORPE (1987). Estos dos últimos autores, además describen cuatro posibles modelos tectono-sedimentarios que predicen diferentes distribuciones de facies dependiendo de la localización del semigraben con respecto al mar. Asimismo, distinguen dos tipos diferentes de sistemas de transporte (lateral y axial) que quedan bien identificados en la figura 22, donde se recogen las principales características sedimentológicas del modelo aplicable a la cuenca sedimentaria catalánide, durante el Pérmico Superior y Triásico Inferior.

Al pie del bloque superior y con mayor intensidad al pie del bloque inferior se desarrolla una sedimentación aluvial cuyos materiales proceden de la erosión de dichos bloques. En el bloque inferior, con una subsidencia mucho mayor, la posibilidad de acumular sedimentos es más elevada, por lo que sus series son mucho más potentes y probablemente la sedimentación más rápida. En contraste con el área fuente local de estos sistemas de abanicos existe el drenaje principal de la cuenca paralela al accidente principal del *rift*, que condiciona el transporte-sedimentación general de la misma. Los materiales transportados por este sistema netamente fluvial, proceden en su mayoría de su curso alto, enriqueciéndose a lo largo de su transporte con elementos que aportan los emisarios laterales procedentes del bloque superior y del bloque inferior. Este modelo explica las rápidas variaciones laterales de facies, los bruscos cambios de potencia y los contactos discordantes entre los diferentes sistemas deposicionales.

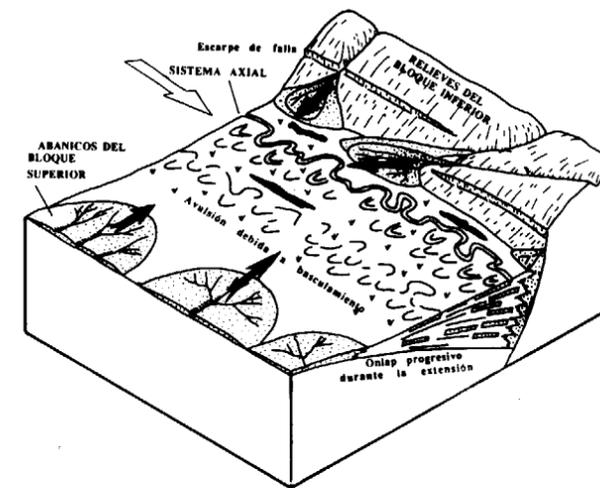


Figura 22.—Semigraben continental con drenaje axial (modificado de LEEDER y GAWTHORPE, 1987).

En base al modelo geométrico expuesto por ROSENDAHL et al. (1986), que condiciona la paleografía de la cuenca y el modelo de transporte-sedimentación, que condiciona el relleno de cada dominio, propuesto por LEEDER y GAWTHORPE (1987) se ha confeccionado un modelo de cuenca que se adapta a las características tecto-sedimentarias, que presentan el Buntsandstein de los Catalánides.

3.5.3. Aplicación del modelo

Clásicamente se ha asumido que la extensión en la zona NE de la Península Ibérica se produjo mediante la reactivación, como fallas normales, de las antiguas fallas de desgarre (*strike-slip*) hercínicas de dirección NE-SO y NO-SE. En la zona de las Cadenas Costeras Catalanas se plantea la duda de cuál de estas dos direcciones sería la que controlaría la dirección de nuestro sistema de *rift* y cuáles actuarían como fallas de transferencia (*transfer faults*).

A partir del estudio de la distribución de las facies en los diferentes sectores se ha deducido como posibles líneas de fractura, que marcan el desarrollo de nuestro *rift*, las de dirección NO-SE (fallas del Llobregat, del Francolí y del Pla del Burgar, en las inmediaciones del Ebro; figura 23). De esta manera y concretamente para el sector de Garraf, la falla principal del Llobregat constituiría el límite O de los afloramientos y

tendría una vergencia NE. En el sector de Prades-Colldejou se localizarían prácticamente en ambos extremos, es decir, una falla constituiría el límite SO de los afloramientos de este sector (la del Pla del Burgar) y la otra (la del río Francolí) se situaría en la zona de La Riba y tendría una vergencia similar a la primera (fig. 24).

3.5.3.1. Sectores de Garraf y Montseny

Los afloramientos del sector de Garraf, con una orientación sensiblemente N-S, corresponden en su mayoría a depósitos de abanicos aluviales retrogradantes de facies *braided* que se adosarían al escarpe de falla (MARZO, 1980); los depósitos correspondientes a los afloramientos más meridionales ocuparían una posición más cercana al plano de la falla principal (fig. 25). Las direcciones de paleocorrientes medidas en este sector indican que los abanicos se desarrollaban hacia el E perpendicularmente al escarpe de falla principal, exceptuando en la serie del Castell d'Erampruyà en la que la dirección dominante del aporte es hacia el S. Esto probablemente es debido a la existencia de áreas fuentes muy locales, situadas en segmentos de falla en escalera (*en échelon*), donde el material se ha depositado temporalmente para luego resedimentarse hacia el depocentro de la cuenca. Esta hipótesis vendría corroborada por el hecho de que es la serie que presenta un mayor espesor de sedimentos, característica propia de los abanicos que se originan por este tipo de estructuras (CROSSLEY, 1984; LEEDER y GAWTHORPE, 1987) (fig. 22).

Al mismo tiempo, en la zona del bloque superior, representada por los afloramientos del sector del Montseny, se desarrollarían una serie de abanicos de pendiente mucho menor pero con una mayor extensión areal, con un sistema canalizado de tipo *braided* en la parte proximal y probablemente meandriforme en las partes media y distal. Estos canales fluirían desde la sierra del Montseny, donde se situaría el área fuente, hacia la zona de máxima subsidencia localizada en la base del escarpe del bloque inferior, donde se construiría el sistema de abanicos aluviales antes mencionado. A lo largo de esta pendiente se desarrollarían una serie de fallas de tipo antitético que en superficie se traducirían en pequeños escalones. Estos provocarían ligeros encajamientos de la red fluvial y la sedimentación de la fracción más grosera tapizando es-

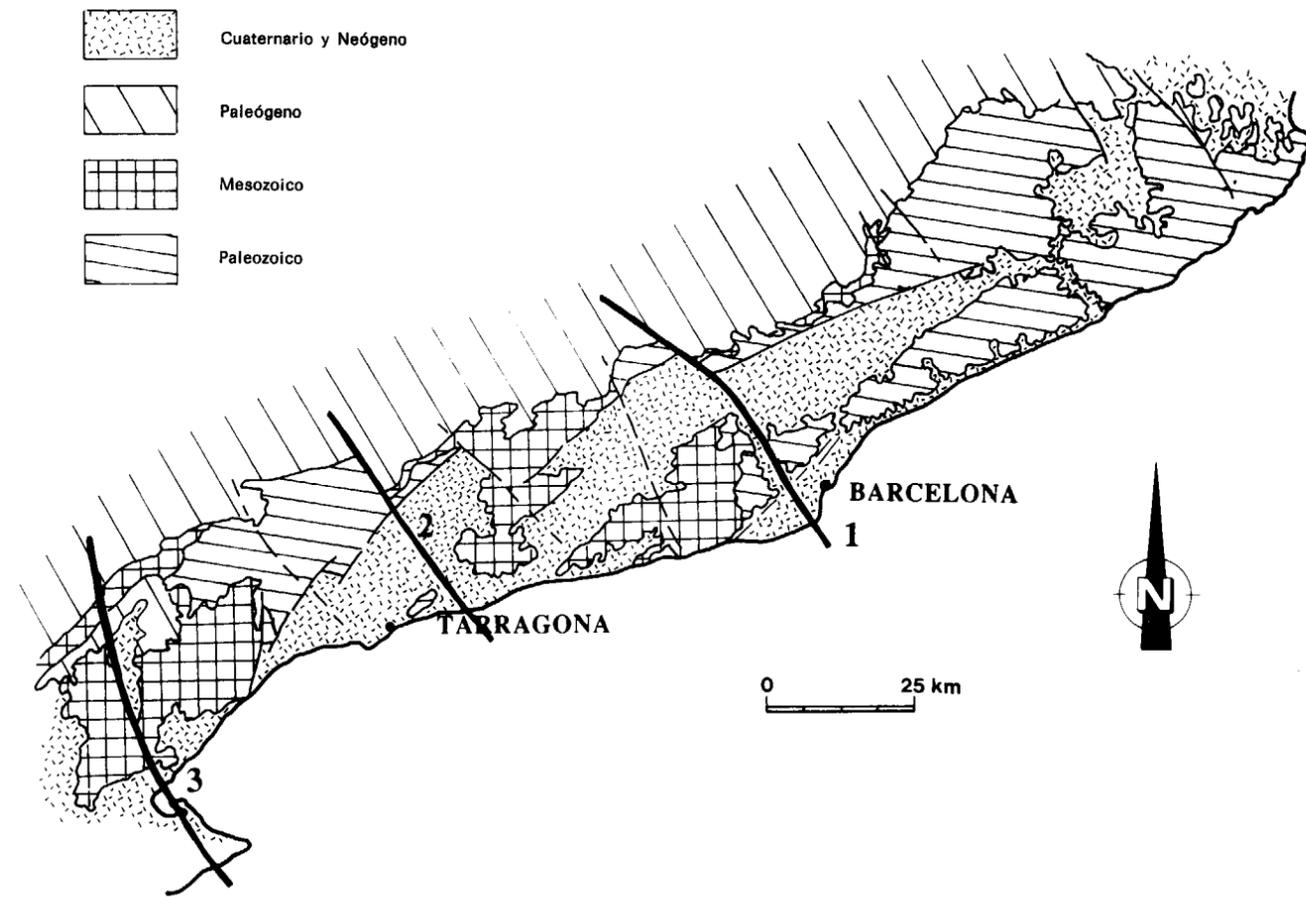


Figura 23.—Alineaciones tectónicas tardihercínicas más importantes que condicionan la sedimentación de la facies Buntsandstein.

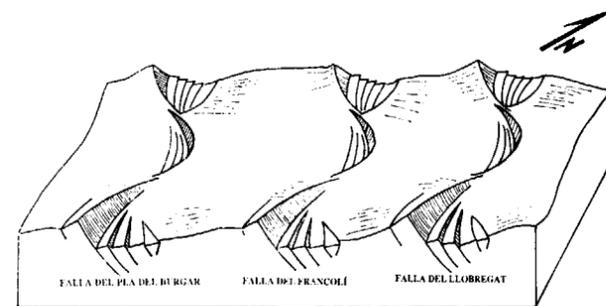


Figura 24.—Bloque diagrama ilustrativo de la disposición de las tres fallas más importantes de la Cordillera Costero Catalana.

tos escarpes de pequeño salto (serie de Torre Nova). En el sector de Montseny, este tapiz está representado por depósitos conglomeráticos de

hasta 15 m de potencia, organizados bien en forma de coladas fangosas, bien en forma de barras con paleocorrientes dominantes hacia el SO.

En la zona de coalescencia entre los abanicos procedentes del bloque superior y del bloque inferior se implantaría una llanura aluvial por la que discurrían axialmente canales de alta sinuosidad, que irían migrando lateralmente (avulsión) y de manera sistemática hacia la zona del bloque inferior, al mismo tiempo que los aportes torrenciales iban disminuyendo. Estos canales formarían un verdadero cinturón meandriforme en el que se depositarían numerosas barras de meandro y abundantes facies de desbordamiento, es decir, lentejones de areniscas intercalados en facies pelíticas. Esta parte de las series, con canales areniscos meandriformes entre pelitas y areniscas de desbordamiento, se

correspondería con la parte superior de las series de El Brull, Tagamanent, El Figaró, Sant Sebastià de Montmany, autopista de Manresa y de Olesa de Montserrat; estas dos últimas ocuparían una posición más cercana a la zona del bloque inferior (fig. 25). Por lo tanto, las series de este sector se caracterizarán por presentar una rápida disminución de potencia hacia el NE (series de El Brull y Tagamanent). Este sistema axial se encargaría del drenaje principal de la cuenca, que finalmente iría a parar al mar, el cual se situaría en dirección SE. La transgresión triásica con la que se originará un cambio en la sedimentación de terrígena a carbonatada, se produciría en esta misma dirección pero en sentido opuesto. Esta transgresión tendría lugar a lo largo de una suave rampa que se habría construido con los sedimentos de facies Buntsandstein.

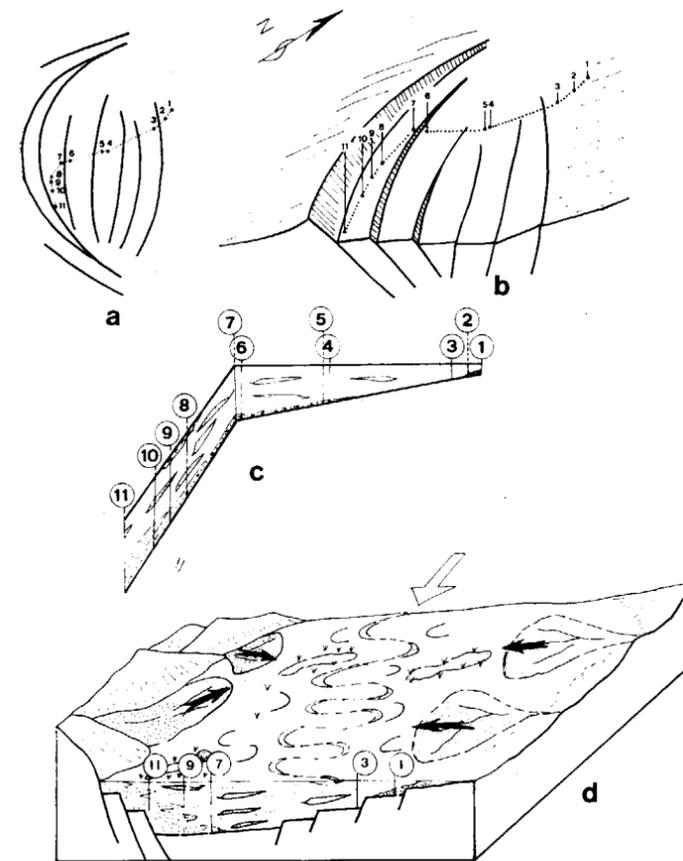


Figura 25.—Situación e interpretación de las series del sector de Montseny-Garraf. a) Semigraben en planta y b) diagrama del mismo con la situación de las series. c) Panel de correlación de las series. d) Interpretación paleogeográfica del sector.

3.5.3.2. Sector de Colldejou-Prades-Miramar

En este sector existirían dos semigrabens que limitan un área de bloque superior intermedia (sierra de Prades). La zona de bloque inferior del semigraben más occidental se situaría al O de los afloramientos de Montroig y Bellmunt del Priorat y la del semigraben más oriental al O de La Riba (fig. 26).

En el extremo suroccidental de este sector, el conjunto de fallas tendría una dirección NO-SE, siendo su vergencia NE. A favor del relieve creado por estos escarpes se irán constituyendo abanicos aluviales retrogradantes de facies gruesas. Al pie del escarpe de mayor salto estaría situada la serie de Montroig con paleocorrientes hacia el E en su parte inferior y hacia el SE en la superior. A partir de este punto y hacia áreas situadas más al NE existirían una serie de escalones, que irían atenuándose en esta dirección dando lugar a un sistema de fallas antitéticas, donde se situarían las series de Falset, Alforja y Siurana. En esta misma dirección habría una disminución progresiva de la potencia de las series hasta la zona de La Riba, límite del semigraben oriental.

En el área de La Riba el escarpe principal de la falla estaría situado en las inmediaciones de esta localidad (al O de la serie de La Riba en el margen derecho del río Francolí). Este escarpe tendría la misma dirección y vergencia que el anterior y se extendería hacia el NO (serie de Mina Atrevida), donde acabaría amortiguándose por la existencia de una fractura sensiblemente perpendicular a la principal del semigraben (fig. 26). A partir de este punto y hacia el interior de la cuenca se originaría un escalonamiento de fallas similar al anterior, es decir hacia el NE, donde se localizarían las series de Cabra del Camp y Coll de Lilla (sierra de Miramar). En esta zona las paleocorrientes indican un aporte general hacia el SO, lo que denota la importancia de la sedimentación procedente del bloque superior (*rol-over sediments*; series de Coll de Lilla y Cabra del Camp).

La sedimentación del bloque superior compartido por ambas áreas estaría condicionada por una falla de desgarre o de transferencia (*strike-slip* o *transfer fault* sensu GIBBS, 1984), de di-

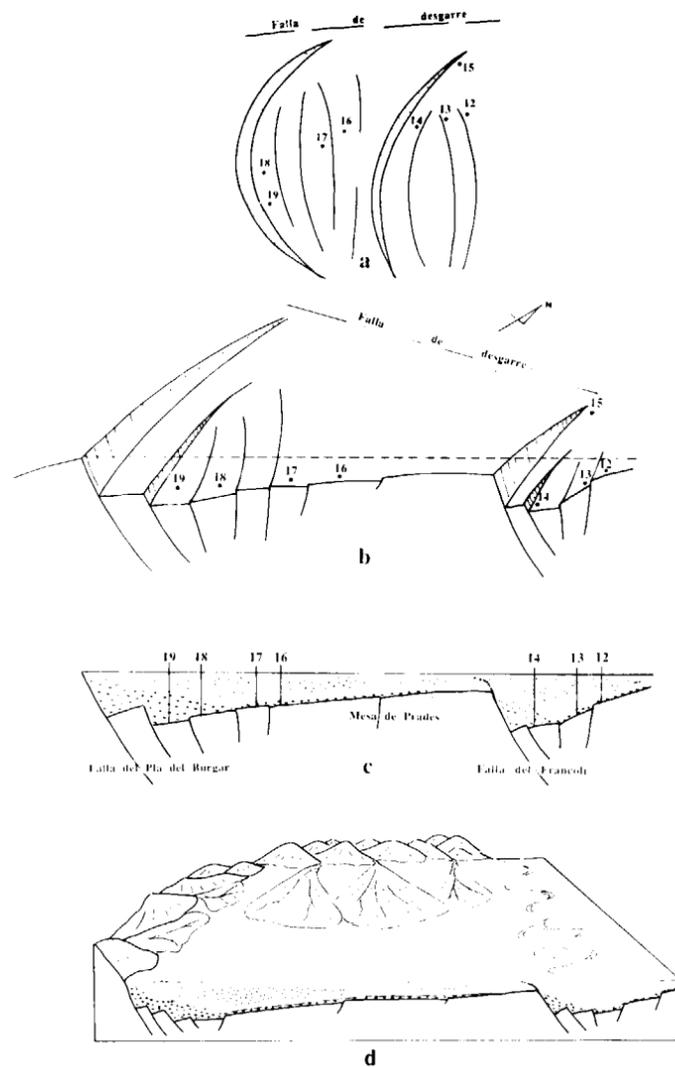


Figura 26.—Situación e interpretación de las series del sector de Collejou-Prades-Miramar. a) Semigraben en planta y b) bloque diagrama del mismo con la situación de las series. c) Panel de correlación de las series. d) Interpretación paleogeográfica del sector.

rección NE-SO (fig. 27). Esta falla actuaría como límite N de la falla del Francolí y de la del Pla del Burgar individualizando dos zonas con características muy diferentes: una subsidente al SE, cuya geometría ya ha sido descrita, y una no subsidente al NO, y que por tanto constituiría una zona de relieve (fig. 26). Esta zona de relieve y por tanto, potencialmente de erosión, se situaría al N de la sierra de Prades y en ella se instalaría la cabecera de la red de drenaje de los abanicos aluviales de cursos trenzados, que coalescerían, originando una *braid plain* con di-

recciones de paleocorrientes entre SE y SO, es decir, perpendicularmente a la dirección de la falla. Estos abanicos estarían representados en las series de Siurana y Alforja y en la parte alta de las series de Montroig y Falset.

Esta disposición paleogeográfica permitiría explicar más fácilmente: la continuidad lateral de los tramos conglomerático (a) y arenoso (b), a lo largo de la sierra de Prades; el que las series de Falset y Montroig tengan paleocorrientes hacia el E en su parte inferior y hacia el SE en la superior y la discordancia existente entre el tramo a y b de la serie de Montroig, ya que ésta representaría el *downlap* de la *braid plain* sobre los abanicos que se adosan al escarpe del bloque inferior.

Los sistemas de transporte axial son menos expansivos que en el sector del Montseny y están bien representados en la parte superior de las

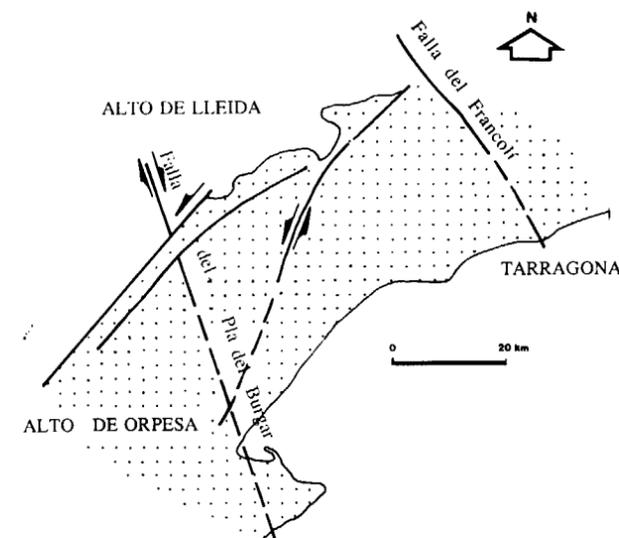


Figura 27.—Principales alineaciones tectónicas tardihercénicas que condicionan la sedimentación de la facies Buntsandstein en el sector de Collejou-Prades-Miramar.

series de Montroig, por un lado, y en las de La Riba, Mina Atrevida y Coll de Lilla por el otro (fig. 26). Se trata de canales de alta sinuosidad que discurren hacia el SE, paralelamente a la dirección de los bloques inferiores, ocupando unas estrechas franjas pegadas a los mismos. Al igual que en el sector más septentrional, la primera transgresión, que dará paso a la sedimen-

tación carbonatada del Muschelkalk Inferior, se habría realizado de SE a NO, es decir, a favor de la dirección en que se desarrolla este sistema *rift*.

3.5.4. Consideraciones de conjunto

La conexión de estos dos sistemas de *rift* representados en los afloramientos de las Cadenas Costeras Catalanas por el semigraben de Garraf-Montseny y los semigrabens de Colldejou-Prades y Miramar, podría deberse al juego de dos sistemas de despegue (*detachment faults*, GIBBS, 1984; LISTER et al., 1986), que limitarían un alto sedimentario o plataforma marginal (*marginal plateau*), que abarcaría desde la zona de La Riba hasta la de Garraf y en la que tan sólo se depositarían materiales en los momentos expansivos de la sedimentación triásica.

Tanto el límite NE de los sistemas de *rift* de la Cordillera Costero Catalana como el límite SO, corresponderían a zonas que podrían, asimismo, considerarse como altos sedimentarios (plataformas marginales) durante el Triásico (Girona y Oropesa *high*, respectivamente, CALVET et al., 1990). Longitudinalmente, es decir, hacia el NO y SE, estos sistemas acabarían en fallas de desgarre de dirección NE-SO, que podrían representar durante el Triásico, o bien altos relativos como parece ser el caso del límite NO (Lleida *high*, CALVET et al., 1990) o bien zonas deprimidas donde se situarían las cuencas marinas del Tethys, como correspondería al límite SE.

Las dimensiones de los sistemas de *rift* de la Cordillera Costero Catalana son parecidas a aquellas que presentan los *rifts* africanos. En éstos, las fallas que limitan el semigraben poseen una longitud de unos 100 Km y la anchura de cada unidad de semigraben es de unos 40-50 Km.

El modelo catalánide, como más adelante se discutirá, va ligado a la evolución de los *rifts* del Pirineo y de la Ibérica, representando el desarrollo de pequeñas cuencas entre estas dos de mayor entidad. Estas cuencas menores alcanzarían un estadio inferior de desarrollo de *rift* y por tanto sus dimensiones serán más reducidas, pero estarían genéticamente relacionadas y poseerían un desarrollo tectosedimentario similar a las de mayor tamaño.

* * *

Este trabajo ha sido financiado en su casi totalidad por la CICYT proyecto núm. PS88-0021 del que fui becado para su realización.

El resto, correspondiente a una parte de los trabajos de campo fue subvencionado mediante una ayuda de la CIRIT («Ajut per a joves investigadors». Año 1988).

REFERENCIAS

- ALEXANDER, J., y LEEDER, M. R. (1987): *Active tectonic control on alluvial architecture*. En: Flores, R.; Ethridge, F., y Harvey, M. (Ed.): *Recent developments in fluvial sedimentology*. Spec. Publ. Soc. Econ. Palaeont. Miner. 39: 243-252.
- ALMERA, J. (1891): *Mapa geológico y topográfico de la provincia de Barcelona. Región primera o de contorno de la capital, con explicación somera en la misma hoja*. 1.ª ed. Topografía de J. Brossa. Barcelona.
- ALMERA, J. (1897): *Mapa geológico y topográfico de la provincia de Barcelona. Región segunda o del río Noya al mar, con explicación somera de la misma hoja*. E. 1:40.000. Topografía J. Brossa. Barcelona.
- ALMERA, J. (1900): *Mapa geológico y topográfico de la provincia de Barcelona. Región primera o contornos de la capital, con explicación somera en la misma hoja*. E. 1:40.000. 2.ª ed. Topografía J. Brossa. Barcelona.
- ALMERA, J. (1902): *Excursión geológica dirigida a estudiar las relaciones del grupo de Montgat con el de Vallcarca*. Mem. Acad. Cienc. y Artes Barcelona (3.ª época), IV (25): 337-344. Barcelona.
- ALMERA, J. (1909): *Descobriments d'una de les antigues flores triásiques al Nord de Barcelona*. Butll. Inst. Cat. Hist. Natural, IV (2): 11-14. Barcelona.
- ALMERA, J. (1913): *Mapa geológico y topográfico de la provincia de Barcelona. Región quinta o del Montseny, Vallés y litoral, con explicación somera en la misma hoja*. E. 1:40.000. Topografía J. Brossa. Barcelona.
- ANADON, P.; COLOMBO, F.; ESTEBAN, M.; MARZO, M.; ROBLES, S.; SANTANACH, P., y SOLE-SUGRAÑES, LI. (1979): *Evolución tectonoestratigráfica de los Catalánides*. Acta Geol. Hispánica, 14: 242-270.
- ARCHE, A., y LOPEZ-GOMEZ, J. (1989): *Fluvial sedimentation during the early rifting phase in the southeastern Iberian Ranges*. En: 4th International Conference on fluvial sedimentology, Excursion Guidebook, 8, 88 pp.
- BASU, A. (1976): *Petrology of holocene fluvial sand derived from plutonic source rocks; implications to paleoclimatic interpretation*. Jour Sed. Petrol., 46: 694-709.
- BAUZA, F. (1876): *Breve reseña geológica de la provincia de Tarragona y Lérida*. Bol. Com. Mapa Geol. España, III: 115-123. Madrid.
- BURLEY, S. D.; KANTOROWICZ, J. D., y WAUGH, B. (1985): *Clastic diagenesis*. En: P. J. Brenchley y B. P. J. Williams (Eds.) *Sedimentology recent developments and applied aspects*, Blackwell Scientific Publications Oxford: 189-226.
- BURLEY, S. D., y KANTOROWICZ, J. D. (1986): *Thin section*

- and SEM textural criteria for the recognition of cement-dissolution porosity in sandstones. *Sedimentology*, 33: 587-604.
- CALAFAT, F. (1988): *Estratigrafía y Sedimentología de la litofacies Buntsandstein de Mallorca*. Tesis de licenciatura. Univ. de les Illes Balears, 126 pp.
- CALVET, F.; TUCKER, M. E., y HENTON, J. M. (1990): *Middle Triassic carbonate ramp systems in the Catalan Basin, northeast Spain: facies, systems tracts, sequences and controls*. Spec. Publs. int. Ass. Sediment. 9: 79-108.
- CANALS, A.; CARDELLACH, E.; RYE, D. M., y AYORA, C. (1992): *Origin of the Atrévada Vein (Catalonian Coastal Ranges, Spain): Mineralogic, Fluid Inclusion, and Stable Isotope Study*. *Economic Geology*, Vol. 87: 142-153.
- CARDELLACH, E.; CANALS, A., y TRITLLA, J. (1990): *Late and post-Hercynian low temperature veins in the Catalan Coastal Ranges*. *Acta Geol. Hispánica*, 25 (1/2): 75-81.
- CLEARY, W. J., y CONOLLY, J. R. (1972): *Embayed quartz grains in soils and their significance*, *Jour. Sed. Petrol.*, 42: 899-904.
- CROOK, K. A. W. (1968): *Weathering and roundness of quartz sand grains*. *Sedimentology*, 11: 171-182.
- CROSSLEY, R. (1984): *Controls of sedimentation in the Malawi rift valley, Central Africa*. *Sedimentary geology*, 40: 33-50.
- DE LA CRUZ, B.; MARFIL, R.; DE LA PEÑA, J. A. y ARRIBAS, J. (1987): *Procedencia y evolución diagenética de las areniscas permotriásicas de la Cordillera Ibérica (Sierra de Albarracín-Boniches-Talayuelas, Provincias de Teruel y Cuenca)*. *Cuad. Geol. Ibérica*, 11: 493-514.
- DIAZ, M. (1983): *Mapa Geológico de España. Informe sedimentológico, Hoja núm. 56, Valencia*. I. G. M. E.
- DICKINSON, W. R. (1970): *Interpreting detrital modes of grauwacke and arkose*. *Jour. Sed. Petrol.*, 40: 695-707.
- DICKINSON, W. R.; BEARD, L. S.; BRAKENRIDGE, G. R.; ERJAVEC, J. L.; FERGUSON, R. C.; INMAN, K. F.; KNEPP, R. A.; LINABERG, F. A., y RYBERG, P. T. (1983): *Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting*. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 94: 222-235.
- DOTT, R. L. (1964): *Wacke, graywacke and matrix - What approach to immature sandstone classification?* *Jour. Sed. Petrol.*, 34: 625-632.
- DUPUY DE LOME, E. (1959): *Mapa Geológico de España. Explicación de la Hoja núm. 668, Sagunto (Valencia)*. I. G. M. E.
- ELLIS, P. G., y McCLAY, K. R. (1988): *Listric extensional fault systems-results of analogue model experiments*. *Basin Research*, 1: 55-70.
- ENRIQUE, P. (1985): *La asociación plutónica tardi-Herciniana del Macizo del Montnegre, Catalánides Septentrionales (Barcelona)*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 579 pp.
- ENRIQUE, P. (1990): *The Hercynian intrusive rocks of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain)*. *Acta Geol. Hispánica*, 25 (1/2): 39-64.
- FONOLLA, F. (1972): *Mapa Geológico de España. Informe sedimentológico, Hoja núm. 668, Sagunto, y núm. 640, Segorbe*. I. G. M. E.
- FORNEY, G. G. (1975): *Permo-Triassic sea level changes*. *J. Geol.*, 83: 773-779.
- FROSTICK, L., y REID, I. (1987): *A new look at rifts*. *Geol. Today*, 3: 122-126.
- FÜCHTBAUER, H. (1974): *Sediments and Sedimentary Rocks 1*. Springer Verlag Stuttgart, 464 pp.
- GAMERMANN, N. (1979): *Contribution a l'étude de la diagenèse des grès: couleur rouge, argiles authigènes et induration. Formations d'Estrada Nova, de Rosario do Sul et de Botucatu (Brésil) et Buntsandstein des Vosges (France)*. Thèse d'Etat Univ. Strasbourg, Sciences Géologiques, mémoire núm. 59, 165 pp.
- GARRIDO-MEGIAS, A., y VILLENA, J. (1977): *El Trias germánico en España: paleogeografía y estudio secuencial*. *Cuad. Geol. Ibérica*, 4: 37-56.
- GIBBS, A. D. (1984): *Structural evolution of extensional basin margins*. *J. geol. Soc. London*, 141: 609-620.
- GOMBAU, I. (1877): *Reseña físico-geológica de la provincia de Tarragona*. *Bol. Com. Mapa Geol. España*, IV: 181-250. Madrid.
- GOY, J. L.; VEGAS, R., y ZAZO, C. (1973): *Mapa Geológico de España, Hoja núm. 696, Burjasot*. I. G. M. E.
- HAMBLIN, A. P., y RUST, B. R. (1989): *Tectono-sedimentary analysis of alternate-polarity half-graben basin-fill successions: Late Devonian-Early Carboniferous Horton Group, Cape Breton Island, Nova Scotia*. *Basin Research*, 2: 239-255.
- HAQ, B. U.; HARDENBOL, J., y VAIL, P. R. (1987a): *Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic*. *Science*, 235: 1156-1167.
- HARWOOD, G. (1988): *Microscope techniques: II. Principles of sedimentary petrography*. En: M. Tucker (Ed.). *Techniques in sedimentology*. Blackwell Scientific Publications: 108-173.
- JOHNSON, M. J.; STALLARD, R. F., y MEADE, R. H. (1988): *First cycle quartz arenites in the Orinoco River basin, Venezuela and Columbia*. *Jour. Geol.*, 96: 263-277.
- JULIVERT, M., y DURAN, H. (1990): *Paleozoic stratigraphy of the Central and Northern part of the Catalan Coastal Ranges (NE Spain)*. *Acta Geol. Hispánica*, 25 (1/2): 3-12.
- JURADO, M. J. (1989): *El Triásico del subsuelo de la cuenca del Ebro*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 259 pp.
- LEEDER, M. R., y ALEXANDER, J. (1987): *The origin and tectonic significance of asymmetrical meander-belts*. *Sedimentology*, 34: 217-226.
- LEEDER, M. R., y GAWTHORPE, R. L. (1987): *Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins*. En: Corward, M. P.; Dewey, J. F., y Hancock, P. L. (Eds.), *Continental extensional tectonics*. Geological Society Special Publication, 28: 139-152.
- LINDHOLM, R. C., y FINKELMAN, R. B. (1972): *Calcite staining: semiquantitative determination of ferrous iron*. *Jour. Sed. Petrol.*, 42: 239-245.
- LISTER, G. S.; ETHERIDGE, M. A., y SYMONDS, P. A. (1986): *Detachment faulting and the evolution of passive continental margins*. *Geology*, 14: 246-250.
- LOPEZ-GOMEZ, J., y ARCHE, A. (1988): *Algunas consideraciones sobre la facies Buntsandstein en el SE de la Cordillera Ibérica (provincias de Cuenca, Teruel, Castellón y Valencia)*. Congreso Geológico de España, comunicaciones, vol. 1: 111-114.

- LLOPIS, N. (1947): *Contribución al conocimiento de la morfoestructura de los Catalánides*. Publ. Inst. «Lucas Mallada». C.S.I.C., 372 pp.
- MALLADA, L. (1890): *Reconocimiento geográfico y geológico de la provincia de Tarragona*. *Bol. Com. Mapa Geol. España*, XVI: 1-175. Madrid.
- MARFIL, R., y GOMEZ-GRAS, D. (1990): *Relaciones entre el ambiente de sedimentación y los procesos diagenéticos en las areniscas del Buntsandstein del Umbral de Ateca (Cordillera Ibérica)*. *Bol. Geol. Minero*, 101: 3-20.
- MARZO, M. (1980): *El Buntsandstein de los Catalánides: estratigrafía y procesos de sedimentación*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona, 317 pp.
- MARZO, M. (1983): *Mapa Geológico de España. Informe sedimentológico, Hoja núm. 48, Vinaroz*. I. G. M. E.
- MARZO, M. (1986): *Secuencias fluvio-eólicas en el Buntsandstein del Macizo de Garraf (provincia de Barcelona)*. *Cuad. Geol. Ibérica*, 10: 207-233.
- MARZO, M., y CALVET, F. (1985): *Guía de la excursión al Triásico de los Catalánides*. II. Col. Estrat. Paleog. Pérm. y Triás. Esp., 175 pp., Seu d'Urgell.
- MATLACK, K. S.; HOUSEKNECHT, D. W., y APPLIN, K. R. (1989): *Emplacement of clay into sand by infiltration*. *Jour. Sed. Petrol.*, 59: 77-87.
- MAURETA, J., y THOS, S. (1881): *Descripción física, geológica y minera de la provincia de Barcelona*. Mem. y Com. Mapa Geol. España, IX, 478 pp. Madrid.
- MILLOT, G. (1964): *Géologie des Argiles...* Masson et Cie. (Eds.). Paris, 499 pp.
- OBIS, A., y CANEROT, J. (1972): *Mapa Geológico de España. Hoja núm. 616, Villafamas*. I. G. M. E.
- PETTIJOHN, F. J.; POTTER, P. E., y SIEVER, R. (1972): *Sand and Sandstones*, Springer-Verlag, New York, 618 pp.
- POSAMENTER, H. W., y VAIL, P. R. (1988): *Eustatic controls on clastic deposition II*. En: *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Spec. Publ., 42: 125-154.
- POSAMANTIER, H. W.; JERVEY, M. T., y VAIL, P. R. (1988): *Eustatic controls on clastic deposition I*. En: *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. SEPM Spec. Publ., 42: 109-124.
- POTTER, P. E. (1978): *Petrology and chemistry of modern big river sands*. *Jour. Geol.*, 86: 423-449.
- RAMOS, A.; DEL OLMO, P., y ALVARO, M. (1985): *El Buntsandstein de la isla de Mallorca*. II Col. Estrat. Paleog. Pérm. y Triás. de Esp., La Seu d'Urgell (Lleida). Resúmenes: 103-104.
- ROSENDHAL, B. R. (1987): *Architecture of continental rifts with special reference to East Africa*. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 15: 445-503.
- ROSENDHAL, B. R.; REYNOLDS, D. J.; LORBER, P. M.; BURGESS, C. F.; MCGILL, J.; SCOTT, D.; LAMBIASE, J. J., y DERKSEN, S. J. (1986): *Structural expressions of rifting: lessons from Lake Tanganyika, Africa*. En: FROSTICK, L. E.; RENAUT, R. W.; REID, I., y TIERCELIN, J. J. (Eds.), *Sedimentation in the African Rifts*. Geological Society Special Publication, 25: 29-43.
- SCOTT, D. L., y ROSENDAHL, B. R. (1989): *North Viking Graben: An East African Perspective*. AAPG Bull., 73: 155-165.
- SCHMIDT, V., y McDONALD, D. A. (1979): *The role of secondary porosity in the course of sandstone diagenesis*. S.E.P.M. Special Publication, 26: 175-207.
- SCHOPF, T. J. M. (1974): *Permo-Triassic Extinctions: relations to seafloor spreading*. *J. Geol.*, 82: 129-143.
- SOLE DE PORTA, N.; CALVET, F., y TORRENTO, L. (1987): *Análisis palinológico del Triásico de los Catalánides (NE España)*. *Cuad. Geol. Ibérica*, 11: 237-254.
- SOLE SABARIS, L. (1939): *Superficies de erosión en las Cordilleras Litorales de Cataluña*. Publ. Univ. Barcelona: 145-158.
- SOPENA, A.; LOPEZ, J.; ARCHE, A.; PEREZ-ARLUCEA, M.; RAMOS, A.; VIRGILI, C., y HERNANDO, S. (1988): *Permian and Triassic rift basins of the Iberian Peninsula*. En: Manspeizer, W. (Ed.), *Triassic-Jurassic Rifting: Continental Breakup and the Origin of the Atlantic Ocean and Passive Margins*, part B. *Developements in Geotectonics*, 22: 757-786.
- SOUTHARD, J. B. (1975): *Bed configurations*. En: *Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences*. S.E.P.M. Short Course, 2, 161 pp.
- VAIL, P. R.; MICHUM Jr., R. M.; TODD, R. G.; WIDMIER, J. M.; THOMPSON III, S.; SANGREE, J. B.; BUBB, J. N., y HATLELID, W. G. (1977): *Seismic Stratigraphy and Global changes of sea level*. En: Payton, Ch. E. (Ed.), *Seismic Stratigraphy-Applications to hydrocarbon exploration*. Am. Assoc. Petroleum Geologists, Mem. 26: 49-212.
- VAN WAGONER, J. C.; MITCHUM, R. M.; CAMPION, K. M., y RAHMANIAN, V. D. (1990): *Siliciclastic Sequence Stratigraphy in Well Logs, Cores, and Outcrops: Concepts for High-Resolution Correlation of Time and Facies*. AAPG Methods in Exploration Series, núm. 7, 55 pp.
- VERNEUIL, E. de, y COLLOMB, E. (1853): *Coup d'oeil sur la constitution géologique de quelques provinces de l'Espagne*. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 2e sér. X: 61-147.
- VEZIAN, A. (1856): *Du terrain post-pyrénéen des environs de Barcelone*. Thèse de Géologie. 116 pp. Montpellier.
- VILASECA, S. (1920): *Contribució a l'estudi dels terrenys triásics de la provincia de Tarragona*. *Treb. Mus. Cienc. Nat. Barcelona*, VIII. 66 pp. Barcelona.
- VIRGILI, C. (1958): *El Triásico de los Catalánides*. *Bol. Inst. Geol. Min. España*, 69: 1-856.
- WALKER, T. R. (1976): *Diagenetic origin of continental red beds*. En: Falke, H. (Ed.), *The Continental Permian in Central, West and South Europe*. Reidel, Dordrecht, Holanda, 240-282.
- WERNICKE, B., y BURCHFIELD, B. C. (1982): *Modes of extensional tectonics*. *J. struct. Geol.*, 4: 105-115.
- WRIGHT, V. P., y TUCKER, M. E. (1991): *Calcretes: an introduction*. En: V. P. Wright y M. E. Tucker (Eds.), *Calcretes*, IAS Reprint series, V. 2: 1-22.
- WURM, A. (1913): *Beiträge zur Kenntnis iberisch-balearischen Trias Provinz*. *Verhandl. Naturhist. Medizin. Vereins zu Heidelberg*, XII, N. F. (4): 477-594.
- ZIEGLER, P. A. (1988): *Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys*. AAPAG Memoir 43, 198 pp.
- ZUFFA, G. G. (1985): *Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results*. En G. G. Zuffa (Ed.), *Provenance of Arenites*, Boston, D. Reidel: 165-189.

AGUAS SUBTERRANEAS

MINIPROGRAMAS (V)

Modelos hidroquímicos y/o de transporte de masas.

Por A. NAVARRO ALVARGONZALEZ (*)

RESUMEN

Se muestran varios programas simples para ordenador, con los que modelizar los cambios en la concentración de sales (o contaminantes) de un acuífero monocapa extenso. Un primer modelo se basa únicamente en el movimiento advectivo (conductivo) de las sales en el agua. Los movimientos del soluto o contaminante debidos a la dispersión y a la difusión no se toman en cuenta. Se muestra un ejemplo de aplicación.

En una segunda parte, se describen otros modelos que toman en cuenta además del flujo conductivo, la dispersión. También se describen ejemplos de aplicación de los programas.

Palabras clave: Modelo digital de acuífero, Modelo hidroquímico, Modelo de calidad de agua, Advección (convección), Dispersión, Difusión, Concentración de sales, Movimiento de contaminantes.

ABSTRACT

In the first part of this document, a simple digital computer program is developed to estimate the changes in concentration of salts (or pollutant) in a simplified groundwater extense aquifer. The model is based in only advective (convective) movement of salts in the water. Dispersion and diffusion are ignored. An application example is described.

In the second part, other models are shown that take also into account dispersive movement. Three situations are examined, continuous injection (one dimension aquifer), instant injection (three dimensional aquifer) and general injection in two dimensions aquifer. Examples for all cases are also offered.

Key words: Groundwater computer model, Groundwater quality model, Advection (convection), Dispersion, Diffusion, Salt concentration, Pollutant movement.

1. INTRODUCCION

Si al agua subterránea en circulación por un acuífero se le incorpora un compuesto químico que pueda considerarse en disolución o suspensión molecular, dicho cuerpo se mueve con el agua que lo contiene. Este cuerpo lo llamaremos en adelante, para simplificar, el «contaminante», aunque puede ser trazas de una sal química, como un sulfato o un cloruro, que no produzca realmente contaminación.

En un modelo digital de calidad, el parámetro que se toma como indicador de la presencia de

contaminante en el agua puede ser muy variado. Si el «contaminante» es una sal química, podría utilizarse cualquiera de los iones como indicador del contenido de sal en el agua, y frecuentemente se utiliza la concentración disuelta (TDS = Total Dissolved Solids), es decir, la cantidad de sal por unidad de volumen de agua pura.

El «contaminante» se mueve dentro del acuífero bajo la influencia de tres causas diferentes:

- Advección o flujo convectivo (flujo de Darcy).
- Dispersión hidrodinámica.
- Difusión iónica.

El flujo convectivo viene representado adecuada-

mente por el flujo medio de agua subterránea, el que resulta de aplicar la ley de Darcy.

La dispersión hidrodinámica resulta del movimiento microscópico de los iones o moléculas del «contaminante» a través de los intersticios del medio en el que se encuentra, con todo un rango de diversas velocidades debidas a la distribución variable del tamaño de los poros y los canales sinuosos en los sedimentos.

La difusión iónica es una disminución del contenido de «contaminante» a causa del gradiente de concentración. El «contaminante» tiende a «diluirse», hacia una distribución uniforme dentro del disolvente.

El efecto de la dispersión hidrodinámica y de la difusión iónica es que las sales se mueven longitudinalmente más despacio que el flujo convectivo, pero además adquieren movimientos laterales diferentes de los del flujo medio del agua. Una masa de «contaminante» introducida puntualmente e instantáneamente en un flujo acuífero normal, se «difumina» formando lo que se denomina «pluma de contaminación», como es bien conocido.

La difusión iónica es un movimiento muy lento, comparativamente con los otros dos, de manera que en los problemas corrientes se ignora.

También la dispersión es lenta comparada, en general, con el flujo de Darcy, por lo que en bastantes casos los modelos hidroquímicos tampoco la consideran. Tal es el caso más común en modelos a gran escala de acuíferos reales, con un cierto contenido en sales, como el cloruro sódico, donde se toma como parámetro, por ejemplo, la concentración en Na, o el total de sales disueltas. En estas ocasiones, un modelo que tenga en cuenta las variaciones de concentración producidas únicamente por el movimiento medio del agua subterránea, añadiendo las variaciones en concentración producidas por las recargas y extracciones, es suficiente para el tratamiento del problema.

Un buen ejemplo de este tratamiento se tiene en el modelo de calidad de agua que se hizo en el área de Santa Clara-Calleguas, Ventura County, California, realizado por el Departamento de Recursos Hídricos del Estado de California (California State Department of Water Resources, informes PB-237 371 y PB-237 372, 1974).

Se parte de un modelo de flujo normal, es decir, un modelo cuantitativo de movimiento de agua, el cual se calibra adecuadamente. Sobre el modelo de flujo, ya calibrado, se tiene en un momento dado una piezometría conocida, y una hidroquímica también conocida. En este caso se utilizó la concentración de sales, TDS, como indicador del contenido químico.

Las variaciones de TDS a lo largo del tiempo y en los diferentes elementos (se usa la división del acuífero en elementos con tratamiento por DIFERENCIAS FINITAS), se deben a los movimientos de masas líquidas. Si hay un volumen de agua con cierta concentración de «contaminante» que sale por el lado de un elemento y entra en otro elemento, hay un cierto transporte de masa de «contaminante» que abandona un elemento y se incorpora a otro. Los contenidos en «contaminante» en esos dos elementos contiguos se modifican consecuentemente.

Si se bombea agua por un pozo, con el agua bombeada hay un cierto volumen de «contaminante» que abandona el elemento en cuestión, y la cantidad de contaminante en el elemento varía. Igual, a la inversa, cuando hay una cierta recarga o percolación de agua de cierta composición hacia el agua de uno de los elementos del modelo en que se ha dividido el acuífero, también entra «contaminante».

Todos estos cambios han de ser tenidos en cuenta. Sobre la base del movimiento de agua en el modelo normal de flujo, en cada intervalo de tiempo (subperíodo) se calcula el movimiento de sales disueltas y se obtiene la repartición de sales al final del subperíodo. Ya se ha dicho que en este primer tipo de modelo simple, no se incluye el movimiento de sales por dispersión. Para incluir la dispersión hace falta conocer un coeficiente de dispersión de los acuíferos, lo que no se tiene comúnmente. En cualquier caso, un repaso a la literatura técnica muestra que cuando lo que se estudia es un movimiento de agua a través de elementos grandes, con superficies del orden del kilómetro cuadrado, el efecto de la dispersión, comparado con la advección, es pequeño. En el modelo más arriba mencionado, se admitió que la dispersión tanto longitudinal como transversal de sales era lenta, y dado el tamaño de los elementos, a lo largo del período de operación, de diez años, la dispersión no llegaba a afectar como factor mayor, frente a otros como

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

recargas y bombeos, la calidad de los flujos subterráneos de un polígono (elemento) a otro.

Una observación adicional. El coeficiente de almacenamiento no es igual al total de agua contenida en el acuífero. El total de agua es igual a la porosidad del acuífero. Por tanto, el contenido total de sales en un polígono es igual a la concentración por la porosidad, y no por el coeficiente de almacenamiento. De forma que se necesita tener una valoración de la porosidad en cada elemento.

En fin, este tipo de resolución simple se basa en un gran número de hipótesis restrictivas: flujo darcyniano, sin dispersión, sin adsorción, sin influencia de la densidad, con igualación de concentraciones dentro de cada incremento de tiempo en todo el interior de cada elemento, etc., por lo que debe aplicarse con muchas precauciones, y mejor a lo largo de grandes períodos de tiempo.

En resumen, para el estudio de la distribución general de sales o de determinados elementos que existen distribuidos por todo el acuífero, el modelo se limita generalmente al movimiento convectivo de los solutos. Los otros dos movimientos quedan absorbidos en el primero. En cambio, si se trata de una introducción puntual de un contaminante o un elemento traza, ya sea instantánea o a lo largo de un cierto intervalo de tiempo, entonces el modelo a aplicar para la reproducción de la «pluma» de contaminación ha de considerar también, al menos, el movimiento dispersivo del contaminante (o trazador).

En los párrafos que siguen se verá un ejemplo de programa para tratar modelos de calidad considerando tan sólo el movimiento advectivo. Después, en otra sección se pasará a considerar el movimiento advectivo juntamente con el de dispersión.

2. MOVIMIENTO CONDUCTIVO (ADVECCION)

2.1. Formulación

Se va a utilizar básicamente el programa ya desarrollado en el artículo segundo de esta serie (A. NAVARRO, «Miniprogramas II») superponiéndole el balance de masas de sales conteni-

das. Es decir, haciendo que se cumpla también la ecuación de continuidad física para el elemento o elementos disueltos o en suspensión que se consideren.

En el caso de movimiento del soluto por pura conducción, transporte o advección el modelo de flujo se considera calibrado y el movimiento del soluto y las variaciones de la concentración se calculan a partir de aquél. Se parte por lo tanto de un modelo de flujo ya conocido y en operación. A los datos de este modelo hay que añadir los datos adicionales precisos para el modelo hidroquímico.

Por ejemplo, puede tratarse de modelizar el contenido en sales disueltas en un acuífero detrítico monocapa. Lo mismo que se necesita una distribución piezométrica de partida, se necesita un mapa hidroquímico de partida, del parámetro que se elija. En este caso puede elegirse el contenido en sales disueltas (TDS) medido en miligramos/litro. Podríamos igualmente haber elegido miliequivalentes, o uno de los iones, como el sodio, en lugar del total de sales.

Utilizando esta distribución química inicial, se asigna a cada elemento (nudo) una concentración específica, incluyendo la de los nudos de borde.

Cada volumen de agua de recarga ha de tener también su concentración conocida.

El agua que contiene cada elemento del acuífero no es la que indica su coeficiente de almacenamiento, sino su porosidad. Los iones existen también en este agua, que no pertenece al agua darcyniana. Por lo tanto, es necesario también estimar la porosidad de cada elemento, o la relación de la porosidad al almacenamiento o rendimiento específico, según la definición clásica (Specific yield). Este «coeficiente de porosidad» se ha de estimar también para cada elemento. Se introduce como dato, y es la relación de la porosidad total a la efectiva o coeficiente de almacenamiento, de manera que el producto del «coeficiente de almacenamiento» por ese «coeficiente de porosidad» nos dé la porosidad, tan real como posible, promedio del elemento en cuestión. Para terrenos gruesos o medio gruesos, el «coeficiente de porosidad» es cercano a uno, es decir, el coeficiente de almacenamiento está muy próximo a la porosidad total. Pero si hay finos, la porosidad puede ser sensiblemente

mayor que el almacenamiento útil, de manera que en este caso, el llamado «coeficiente de porosidad» puede aumentar sensiblemente. En detríticos normales, se usan valores entre 1 y 1.3. No confundir el «coeficiente de porosidad» que aquí se usa con la «porosidad». La «porosidad» es el resultado de multiplicar el coeficiente de almacenamiento por el «coeficiente de porosidad».

Con esto se completan los datos adicionales necesarios para el modelo químico: Concentración inicial media en cada elemento (polígono), concentración en cada volumen de recarga o infiltración para cada elemento y período de tiempo, y coeficiente de porosidad para cada elemento. Ya se aprecia que, a pesar de tratarse de un modelo sumamente simple y simplificado, los datos básicos necesarios son ya de por sí bastante difíciles de obtener, cuando no totalmente imposibles de obtener con exactitud. Se aprovecha por ello para insistir una vez más en lo absurdo que resulta exigir un programa o método mucho más preciso matemática y físicamente cuando los propios datos de partida están llenos de incertidumbres.

Terminado el modelo de flujo y vistos los resultados, entre los que figuran los del balance de masas de agua para cada elemento y período, el cálculo de los cambios de concentración del parámetro químico elegido resulta un proceso directo y sencillo de entradas y salidas en el elemento.

También en este cálculo se introduce o existe un sensible elemento de imprecisión. En efecto, si un elemento en cuyo acuífero hay un volumen de agua «A» con una concentración de sales (o contaminantes) «a» se introduce un cierto volumen «B» de agua desde otro elemento o a través de la superficie, de concentración «b», la mezcla de ambos no se realiza instantáneamente. Para obtener la concentración final resultante «cfr»,

$$cfr = (A*a + B*b) / (A+B) \quad [1]$$

se necesita cierto tiempo. Si a la vez, del elemento sale un volumen C de agua, la concentración de este agua de salida puede ser cualquiera, desde «a» o «b» hasta «cfr».

No hay forma de resolver este problema, sino suponer que las mezclas se realizan más o me-

nos instantáneamente dentro de los subperíodos de tiempo que utiliza el programa. Y en cualquier caso, como las modificaciones de entradas y salidas de masas de agua se van sucediendo, hay que adoptar una metodología que se use consistentemente a lo largo de todo el programa. El problema de establecer la composición adecuada Cij del flujo que circula entre elementos de diferente concentración Ci, Cj, ha sido abordado por diferentes autores, y se ha propuesto la fórmula:

$$Cij = Ci * D + Cj * (1-D) \quad [2]$$

con D variando de 0 a 1. El valor 0,75 ha sido usado para algunos modelos en California, pero finalmente se adoptó el valor 1, es decir el agua tiene la concentración del elemento de donde proviene.

Por otro lado, si los volúmenes de agua en circulación son muy grandes comparativamente con los volúmenes de agua almacenada en el elemento, o con las recargas o infiltración, puede ocurrir que, si no se toman las entradas y salidas en un cierto orden, lleguen a aparecer concentraciones negativas, lo que es un absurdo físico.

El criterio adoptado aquí es el de D=1, es decir, que las aguas que salen del elemento reflejan la concentración resultante de las aguas que ingresan en el mismo. De esta forma se evita la anomalía arriba indicada. Primero se consideran las entradas y luego las salidas.

Las concentraciones resultantes en cada elemento se toman como concentraciones de partida en el período siguiente, igual que como se hace con las piezometrías.

2.2. El programa

Para simplificar, se basa en el modelo de acuíferos monocapa, con malla cuadrada uniforme que se describió en el artículo II de estas series (NAVARRO, 1992). El programa es también básicamente el mismo que entonces, con las únicas adiciones de lectura y escritura de los datos químicos y cálculos de las concentraciones.

El programa (HIDRO1.BAS) se refleja en la figura 1. Para su explicación nos referiremos al programa del mencionado artículo II de estas series. Las líneas del programa son las siguientes:

to así), salvo en el elemento 7, donde se supone algún tipo de industria con efluentes de elevada concentración en sales (30 gr/l durante el primer año y 35 gr/l en el segundo período).

El programa reproduce la concentración inicial (fig. 5), luego escribe el resultado del modelo de flujo para el primer año y las concentraciones finales (fig. 6), y por último escribe los resultados del segundo año (fig. 7).

En el elemento 7 principalmente, y en los que están aguas abajo, 3, 6 y 9, se observa la influencia del vertido de agua con alto contenido en sales.

Per.= 0

Po.	Conc. (mg/l)
1==	1500
2==	1400
3==	1200
4==	1500
5==	1400
6==	1200
7==	1000
8==	1000
9==	1500
10==	1200
11==	1000
12==	1000

Figura 5.

AÑO = 1

POL	NIVELH	NUMERO DE ITERACIONES = 185						
		RESIDUAL	INF-EXT	VAR.ALM	FLUJOL1	FLUJOL2	FLUJOL3	FLUJOL4
1	5.14	0.000	1.000	0.024	-0.763	0.304	0.245	-0.763
2	5.42	0.001	1.000	0.025	-8.937	3.528	4.739	-0.304
3	6.62	0.000	1.000	0.067	-16.532	11.237	7.891	-3.528
4	6.78	0.000	1.100	0.032	-0.245	1.100	-0.915	-1.008
5	7.58	0.000	1.100	0.055	-4.739	4.839	-0.044	-1.100
6	9.25	0.002	1.200	-0.018	-7.891	9.776	1.738	-4.839
7	13.07	0.000	0.900	-0.046	-8.236	12.526	4.540	-9.776
8	18.01	0.000	0.200	0.000	4.587	4.233	3.507	-12.526
9	8.11	0.001	1.100	1.848	0.044	2.767	-1.035	-1.027
10	10.09	0.000	0.200	0.077	-1.738	9.849	-5.466	-2.767
11	15.17	0.001	0.200	0.006	-4.540	5.369	8.926	-9.849
12	20.37	0.000	2.000	-0.702	-3.507	2.450	3.723	-5.369

Per.= 1

Po.	Conc. (mg/l)
1==	139
2==	705
3==	1053
4==	349
5==	1127
6==	1668
7==	2229
8==	893
9==	1312
10==	866
11==	874
12==	681

Figura 6.

AÑO = 2

POL	NIVELH	NUMERO DE ITERACIONES = 80						
		RESIDUAL	INF-EXT	VAR.ALM	FLUJOL1	FLUJOL2	FLUJOL3	FLUJOL4
1	5.09	-0.000	1.200	-0.000	-0.779	0.146	0.212	-0.779
2	5.22	-0.001	0.900	-0.001	-8.848	3.175	4.916	-0.146
3	6.35	-0.001	-1.000	-0.003	-15.971	11.946	8.196	-3.175
4	6.40	-0.001	0.800	-0.002	-0.212	1.300	-0.899	-0.991
5	7.28	-0.001	0.700	-0.004	-4.916	4.579	0.932	-1.300
6	9.02	-0.002	0.800	-0.006	-8.196	9.820	2.147	-4.579
7	12.98	-0.001	0.850	-0.002	-8.019	12.432	4.555	-9.820
8	17.97	-0.000	0.190	-0.001	4.802	4.431	3.008	-12.432
9	7.90	-0.001	1.000	-0.055	-0.932	2.171	-1.151	-1.144
10	9.98	-0.001	0.300	-0.003	-2.147	9.638	-5.623	-2.171
11	15.11	-0.001	0.300	-0.002	-4.555	4.960	8.930	-9.638
12	20.24	-0.000	1.800	-0.006	-3.008	2.459	3.704	-4.960

Per.= 2

Po.	Conc. (mg/l)
1==	107
2==	924
3==	1344
4==	613
5==	1391
6==	1850
7==	2371
8==	898
9==	1181
10==	821
11==	862
12==	700

Prog.= hidro. bas Arch.= hidro. dat

Figura 7.

3. MOVIMIENTO POR DISPERSION Y DIFUSION

3.1. Difusión

La difusión es un resultado de la acción molecular en los fluidos. El flujo de difusión es proporcional al gradiente de concentración:

$$\text{Flujo por difusión} = D_m * (dC/dX) \quad [3]$$

donde dC/dX es el gradiente de la concentración y Dm es el coeficiente de difusión molecular. Los estudios indican que en el caso de un fluido moviéndose dentro del rango de la Ley de Darcy, la difusión molecular disminuye al aumentar la velocidad de circulación. Sólo con velocidades de circulación menores del cm/hora empieza a tener importancia relativa la difusión. En nuestro caso NO lo consideraremos aisladamente, sino incluido conjuntamente con la dispersión, que pasamos a examinar.

3.2. Dispersión

La dispersión (hidrodinámica) es un proceso de mezcla de dos fluidos que resulta primariamente

por las variaciones mecánicas que tienen lugar cuando los fluidos se mueven por el interior de los complejos canales que forman los poros de los sedimentos. Como resultado, los elementos fluidos se mezclan y las sales se dispersan en el medio. La cantidad de dispersión que ocurre viene controlada por la forma y tamaño de los poros y por la velocidad a la que entran las sales (o contaminantes) al acuífero.

La definición precisa del coeficiente de dispersión es muy complicada, ya que intervienen parámetros como la «dispersividad del medio poroso», la «conductancia media de un canal elemental», la «tortuosidad del medio», la «permeabilidad promedio del medio», la «longitud promedio de las partículas», la «velocidad media», las «velocidades reales direccionales», e incluso también el «coeficiente de difusión molecular». Así que resulta prácticamente imposible entrar en él de una forma rigurosa y apriorística. La definición debería incluir tres fases diferentes: los granos, el agua y el soluto. Reuniendo en un expresión los flujos dispersivo (de mayor entidad) y difusivo (de menor entidad) se obtiene lo que se define como «coeficiente de dispersión hidrodinámica» que intenta reflejar en un solo coeficiente la multitud de factores variables antes mencionada, y que de alguna manera permitiría su estimación partiendo de una serie de medidas de campo o de asignaciones hipotéticas de partida de ciertos parámetros.

Hay fórmulas más o menos empíricas (y matemáticas) complejas para valorar (calcular) coeficientes de dispersión, pero no las vamos a desarrollar aquí. Únicamente se dará alguna idea de cómo asignarle algún valor.

La dispersión ocurre tanto en la dirección del flujo (longitudinal) como normal a él (transversal). La dispersión, ya se ha dicho que es función del medio y de la velocidad del flujo. La característica que refleja el medio, se denomina «dispersividad». La relación entre dispersión longitudinal y transversal es similar a la relación entre dispersividad longitudinal «al» y dispersividad transversal «at». Mientras que «al» es del orden de magnitud del tamaño medio de los granos del acuífero, el cociente longitudinal/transversal crece con la velocidad, desde 3 ó 4 para velocidades muy pequeñas hasta 10 ó 20 para velocidades grandes (velocidades de agua subterránea).

De forma similar que ocurre con la difusión, el flujo de dispersión es también

$$\text{Flujo dispersión} = D * (dC/dX) \quad [4]$$

proporcional al gradiente de la concentración, y a un «coeficiente de dispersión», D.

El coeficiente de dispersión, que pretende reunir todos los anteriores parámetros mencionados es una de las principales incógnitas a estimar para tratar de construir un modelo hidroquímico. Generalmente no se conoce, y para calcularlo hay que partir de una serie histórica de mediciones en las que se relacione la concentración inicial con la concentración al cabo de diferentes tiempos, todo ello en un mismo lugar, o mejor en varios lugares simultáneamente. Para el tipo de problemas que se discuten en estas series de modelos simples y programas cortos, no se suele disponer de tales mediciones. Entonces se busca una primera estimación de dicho coeficiente de dispersión en función de la experiencia o de una serie de tentativas.

El coeficiente de dispersión es esencialmente una función de la velocidad media del flujo, «V», y de la geometría del medio, «al» (generalmente llamada dispersividad longitudinal). En la figura 8 se dan valores del coeficiente para un acuífero poroso con una mediana de diámetro de grano de 0,45 mm y porosidad promedio del 39,5 por 100, en relación con la velocidad media del flujo subterráneo, valores obtenidos hace tiempo en ensayos de campo, en Canadá.

Para un mismo diámetro de grano («al»=partículas), el coeficiente de dispersión también varía con la velocidad de movimiento del trazador o contaminante. En la figura 9, basada en otros estudios, se ofrece una muestra de esta relación

Velocidad del flujo (m/día)	Coef. dispersión (m ² /día)
0,432	25,92
0,864	51,84
1,728	86,4
3,456	172,8
4,32	190,08
18,32	1296,0
54,95	3283,2
91,58	5184,0
138,24	7344,0

Figura 8.

Tamaño grano (mm)	Coef. dispersión long. (m ² /día)	Velocidad (m/día)
1,4	56,16	5,53
1,4	259,2	77,76
1,4	475,2	216,0
1,4	734,4	423,36
1,4	1036,8	699,84
0,92	43,2	7,8
0,92	138,24	54,0
0,92	319,68	182,82
0,92	475,2	423,36
0,92	648,0	699,84
0,45	17,28	7,0
0,45	77,76	77,76
0,45	95,04	138,24
0,45	190,08	332,12
0,45	319,68	779,76

Figura 9.

entre tamaño de grano, velocidad del fluido y valor del coeficiente de dispersión.

Estas tablas (figs. 8 y 9) pueden ayudar a dar un primer valor al coeficiente de dispersión en estos modelos simples iniciales que estamos describiendo, a falta de mayor información de campo.

En conjunto, para problemas en donde la Ley de Darcy pueda aplicarse, la llamada dispersión mecánica (longitudinal) es dominante y proporcional a la velocidad del flujo [L/T].

$$DI = al * V [L^2/T] \quad [5]$$

y a «al», es decir, a la «dispersividad longitudinal», que se aproxima (?) con el tamaño medio de las partículas [L]. El término difusión es despreciable y sólo interviene en la dispersión transversal.

3.3. Transporte total

El transporte total, que resultaría de los tres mecanismos de convección, dispersión y difusión se representa en su forma más general tridimensional por una ecuación del tipo de:

$$q = [C*Vj - Dm*dC/dj - D*dC/dj] \quad [6]$$

(j extendida a x, y, z)

en donde el signo negativo que aparece delante de los términos de dispersión (D) y difusión (Dm) se debe a que la derivada dC/dj es negativa.

3.4. Problemas básicos

Ya se ha indicado que los problemas donde la dispersión es relevante son aquellos en que hay una entrada en un punto, o en un frente, de una masa o cantidad de contaminante o trazador en un acuífero en el que existe cierto flujo darcy-niano.

El «modelado» normal de una contaminación o un trazador difiere mucho de los problemas anteriores que se han tratado en esta serie de artículos. La diferencia principal se debe a dificultades de cálculo matemático. Esta diferencia fundamental es la siguiente: Ahora, en los modelos que se van a describir, para reproducir el estado y concentración de un trazador o contaminante, se supone que la velocidad del flujo del agua en el acuífero es un DATO de entrada.

Se supone que la evolución de la contaminación ocurre dentro de un espacio de dimensiones relativamente localizadas, espacio dentro del cual la velocidad del flujo subterráneo puede tomarse como constante en el tiempo y conocida.

El problema se simplifica por tanto notablemente. A partir de esta simplificación, lo que se trata normalmente son dos casos determinados: variación de la contaminación en la dirección del flujo (problema unidimensional, o en «x») o variación de la contaminación tanto longitudinal como lateralmente (problema bidimensional, o en «x» e «y»). En algunas soluciones analíticas puede considerarse también la variación de la concentración en la tercera dimensión, vertical o en «z», y generalmente se iguala a la variación según la dirección «y».

3.5. Problema unidimensional. Aporte constante.

Se considera un aporte contaminante, en un punto dado de un acuífero unidimensional, de sección constante, con una concentración en el origen, invariable, C0, a lo largo del tiempo. No es por tanto una descarga instantánea. Si a la velocidad de flujo constante, V, y a la concentración de soluto en el origen constante, se añaden las simplificaciones de coeficiente de dispersión constante, D, y parámetros hidráulicos (permeabilidad, porosidad) constantes, la ecuación dife-

rencial que rige la variación de la concentración, C, a lo largo de la dirección «x», resulta (Dy=0):

$$dC/dt = -V * dC/dx + D * d(dC/dx)/dx \quad [7]$$

Esta ecuación admite solución analítica directa o solución en diferencias finitas. Ambas pueden hacerse en ordenador, pero dada la simplicidad del cálculo, aquí sólo se va a considerar la solución analítica.

La solución analítica, es de la forma (RIFAL y otros, 1956), (OGATA y BANKS, 1961):

$$C/C0 = 0.5*[1-erf(u) + exp(v)*(1-erf(w))] \\ u=(x-V*t)/SQR(4*D*t) \quad v=x*V/D \\ w=(x+V+t)/SQR(4*D*t) \quad [8]$$

en la que erf = Función de error, exp = Función exponencial, V = Velocidad media del flujo [m/día], C0 = Concentración inicial en el punto fuente [% u otra], D = Coeficiente de dispersión longitudinal [m²/día], t = Tiempo [día], x = distancia del punto en cuestión al punto fuente [m].

En la figura 10 se da un programa de ordenador para el cálculo (CONI. BAS), con una fuente continua. El programa se basa en la aplicación directa de la fórmula [8].

```

1 COLOR 15,13,13:CLS:"Nombre=CONI.BAS Cont.Unidim.Analit. Navarro- Dic. 1992
2 INPUT "Velocidad del flujo [m/dia]=":V
3 INPUT "Dispersión longitudinal [m^2/dia]=":D
4 INPUT "Concentración inicial en origen=":C0
5 INPUT "Tiempo [dia]=":T:INPUT "Distancia [m]=":X
6 IF T=0 THEN GOTO 11
7 IF X=0 THEN GOTO 11
8 U=(X-V*T)/SQR(4*D*T):V=(X+V*T)/SQR(4*D*T):Z=X*V/D
9 IF V>25*D/V THEN 12
10 Y=U:GOSUB 18:ERF1=ERF:Y=V:GOSUB 18:ERF2=ERF
11 C=.5*C0*(1-ERF1+EXP(Z)*(1-ERF2)):GOTO 13
12 Y=U:GOSUB 18:ERF1=ERF:C=.5*C0*(1-ERF1)
13 IF C=1 THEN C=1
14 IF C<0 THEN C=0
15 B$="###":PRINT "Concentracion=":PRINT USING B$;C
16 INPUT "Otros datos (s/n)":A$:IF A$="s" THEN 5
17 END
18 ERF=(Y-Y^3/3+Y^5/10-Y^7/42+Y^9/216)*2/SQR(3.141592):RETURN
    
```

Figura 10.

Por ejemplo, para V=2, D=25 y C0=1, para un tiempo de T=5, y a una distancia de X=20 resulta una concentración C=0.32.

Más ilustrativo, pero eso ya depende de cada configuración y hay que modificar ligeramente el programa de la figura 10, es el obtener un cuadro de valores para tiempos y distancias. Por ejemplo, si se suprime la línea 5 del programa de la figura 10, y se la sustituye por

```
5 FOR T=1 TO 20 : FOR X=0 TO 40 STEP 4
```

y la línea 15 se sustituye por la

```
15 B$="###":LPRINT USING B$;C::NEXT X:LPRINT:NEXTT
```

Se obtiene un cuadro como el de la figura 10 en el que cada línea representa la concentración en determinado día, a diferentes distancias, y se visualizan mejor los cambios en dicha concentración, al ir corriendo el tiempo.

1.00	0.61	0.29	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.80	0.47	0.29	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.83	0.56	0.39	0.26	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.85	0.62	0.47	0.34	0.24	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.87	0.66	0.52	0.40	0.31	0.21	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.88	0.70	0.56	0.45	0.36	0.27	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.89	0.72	0.59	0.49	0.40	0.33	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00
1.00	0.90	0.74	0.62	0.53	0.44	0.37	0.28	0.07	0.00	0.00	0.00
1.00	0.91	0.76	0.65	0.55	0.48	0.41	0.33	0.18	0.00	0.00	0.00
1.00	0.92	0.77	0.67	0.58	0.50	0.44	0.37	0.25	0.00	0.00	0.00
1.00	0.92	0.79	0.68	0.60	0.53	0.47	0.41	0.31	0.00	0.00	0.00
1.00	0.93	0.80	0.70	0.62	0.55	0.49	0.44	0.36	0.12	0.00	0.00
1.00	0.93	0.81	0.71	0.64	0.57	0.52	0.46	0.39	0.21	0.00	0.00
1.00	0.94	0.82	0.73	0.65	0.59	0.54	0.49	0.43	0.27	0.00	0.00
1.00	0.94	0.83	0.74	0.67	0.61	0.56	0.51	0.46	0.33	0.00	0.00
1.00	0.94	0.84	0.75	0.68	0.62	0.58	0.53	0.48	0.37	0.00	0.00
1.00	0.95	0.84	0.76	0.69	0.64	0.59	0.55	0.51	0.41	0.04	0.04
1.00	0.95	0.85	0.77	0.70	0.65	0.61	0.57	0.53	0.44	0.13	0.13
1.00	0.95	0.86	0.78	0.71	0.66	0.62	0.59	0.55	0.47	0.19	0.19
1.00	0.95	0.86	0.78	0.72	0.67	0.64	0.60	0.57	0.50	0.25	0.25

Figura 11.

3.6. Aporte instantáneo en un acuífero

De forma similar puede considerarse que en un acuífero con velocidad de flujo constante se realiza una inyección instantánea de sales o contaminante. El contaminante o la sal se propaga en el acuífero, arrastrado por el flujo, pero además dispersándose y difundiendo en todas direcciones. Va tomando la conocida forma conocida como «pluma», cada vez más extensa y con concentraciones menores. A su vez, la concentración de elemento en el interior de la pluma tiene una

comparado con el del agua en el elemento. Se traspasa el valor de la concentración al final de cada subperíodo, CF(I), al inicial C(i), del subperíodo siguiente. Se pasa al subperíodo siguiente, y si ya se ha hecho el último, estamos al final del período en cuestión y se escriben resultados.

36-37 — Se identifica el nudo o elemento para el que se quiere conocer la concentración al final del período, y si hay otro nudo o no. Se van obteniendo así los valores puntuales que interesan, en cada subperíodo.

A veces, y así ocurre con el ejemplo que se va a ver a continuación, puede obtenerse una visión conjunta de las concentraciones para todo el modelo, a cada período. Para ello basta sustituir las líneas 36-37 del programa por las siguientes:

```
36 E$= "###.##" :A=1:B=10:FOR A=1 TO B: PRINT USING E$,C(I);:NEXT I
37 PRINT:A=A+10:B=B+10: IF A<65 THEN 36
```

o similares, para obtener la escritura de todo el conjunto.

38 — Se pasa al período siguiente, y en su caso, se termina el programa.

3.9. Problema bidimensional. Ejemplo

Para aclarar las anteriores explicaciones nada mejor que un ejemplo sencillo. Se elige, sobre un acuífero, un espacio geométrico que tiene la configuración de la figura 15. Se las ha dividido en 70 cuadrículas, de 10 metros de lado, y como no tiene bordes impermeables se la ha rodeado de 38 nudos de borde.

En este tipo de modelo, la variable no es la piezometría, sino la concentración del elemento en cuestión, asignada a cada elemento, y que puede variar de elemento a elemento y con el tiempo.

Se numeran las cuadrículas del 1 al 70, como muestra la figura, y los nudos de borde, de 71 a 108. El archivo de datos se monta con un editor ASCII (p. e. el Editor de Norton u otro) de la siguiente forma:

Primero una línea:

```
108 70 10 2 10 15 2
```

es decir, 108 nudos en total (los 70 de la cua-

drícula más los 28 de borde), 70 elementos sobre los que se va a calcular la concentración del cuerpo elegido. 10 períodos y 2 subperíodos [día]. 10 metros de longitud cada lado de la cuadrícula, el coeficiente de dispersión longitudinal igual a 15 [m²/día], y el coeficiente de dispersión transversal de 2 [m²/día]. Por supuesto que el coeficiente de dispersión longitudinal tiene la dirección de la velocidad del flujo, y el transversal es perpendicular a él.

Después hay una línea para cada elemento. Por ejemplo, para el elemento 11 es:

```
11 12 22 21 83 82 81 1 2 0 2 1 10 .5
```

lo que quiere decir: Número del elemento y número de los ocho nudos que tiene alrededor, contados en sentido de las agujas del reloj, comenzando por el de la hora 3 (el nudo 12). El último de esos ocho nudos, en posición NE mirando la figura 15, es el 2.

Se lee después la concentración inicial, en [gr/litro]=[kgr/m³], que aquí se ha supuesto 0. Se dan después las componentes de la velocidad del flujo en el elemento, referidas a los ejes X,Y adoptados, que aquí han sido los lados de las cuadrículas. Se ha supuesto VX=2 [/día], VY=1 [m/día], con lo que el valor de la velocidad en el elemento es de $V=\sqrt{VX^2+VY^2}=2,2361$. Se ha supuesto que concentración inicial y la velocidad del flujo son las mismas para todos los elementos, pero no tiene que ser así, y hay libertad de asignar los valores que se consideren más apropiados. Por último se lee el espesor de acuífero saturado, 10 [m], y la porosidad, valores que se han tomado también arbitrariamente iguales para todos los nudos.

La única restricción real es que la velocidad no varía a lo largo del tiempo. No sería complicado hacerla variar para cada período, si fuese necesario. Bastaría, en la instrucción de lectura de la velocidad hacer algunas modificaciones. VX(i), VY (i) pasarían a VX(i,T),VY(i,T). Y en vez de INPUT 1, VX,VY habría que poner:

```
FOR T=1 to NP: INPUT 1, VX(il,T),VX(il,T): next T
```

y agregar los datos correspondientes en el archivo de datos de entrada. En este ejemplo, para simplificar, se toma, como se ha dicho, la velocidad constante en el tiempo.

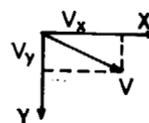
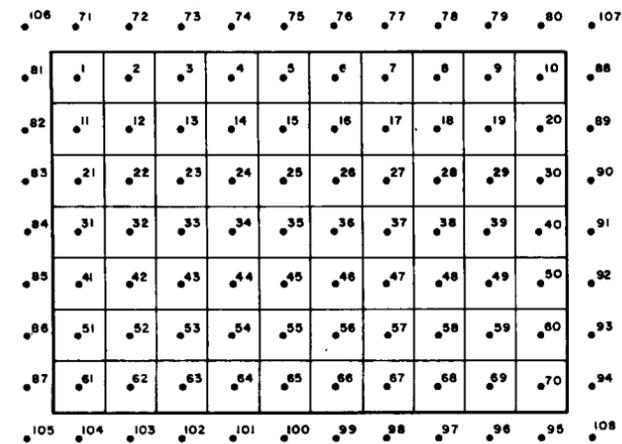


Figura 15.

Se leen después, para los nudos de borde, de 71 a 108, los valores de la concentración inicial, que aquí también se toman cero.

Por último se identifica el número de elementos donde hay recarga de contaminante, trazador o sal, 2 en este ejemplo, y su localización correspondiente, 11 y 12 respectivamente, y las cantidades inyectadas, en [gr/litro]=[kgr/m³]. El archivo de datos toma la forma, para esto,

```
2
11 660 0 0 0 0 0 0 0 0
12 800 0 0 0 0 0 0 0 0
```

En el elemento 11 se inyectan 660 kilogramos del cuerpo en cuestión en el primer período (dos días), y nada en los siguientes. En el 12, 800 kilos en dos días y nada después.

Se termina con esto el archivo de datos.

Al operar el programa, se observa el resultado, para el elemento 11, por ejemplo, de una concentración de 1.06, 0.46, 0.24, 0.14, etc., respectivamente, para los períodos 1, 2, 3, 4, etc.

Introduciendo en el programa las variantes arriba mencionadas para obtener, para este modelo, un cuadro completo de las concentraciones en cada período, los resultados se observan recogidos (parcialmente) en la figura 16, donde aparecen, como ejemplo, las concentraciones al cabo

Periodo= 1

0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1.06	1.41	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.05	0.14	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periodo= 5

0.07	0.11	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.09	0.23	0.27	0.18	0.08	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.03	0.18	0.30	0.28	0.16	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.06	0.16	0.19	0.14	0.06	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.01	0.05	0.08	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Periodo= 10

0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.01	0.05	0.09	0.11	0.09	0.04	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.03	0.10	0.15	0.16	0.12	0.07	0.03	0.01	0.00	0.00	0.00
0.00	0.01	0.05	0.12	0.17	0.16	0.12	0.06	0.03	0.01	0.00	0.00
0.00	0.00	0.02	0.06	0.12	0.14	0.12	0.08	0.04	0.02	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.02	0.05	0.08	0.08	0.06	0.04	0.02	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.00

Progr.=addi0.bas Arch.=addi.dat

Figura 16.

del primer período (dos días), del quinto período (diez días) y del décimo período (veinte días). Puede apreciarse el desplazamiento de la «pluma», y su dispersión longitudinal y transversal al pasar el tiempo.

4. CONCLUSIONES

Recordemos que se han visto cuatro modelos simples para los siguientes casos específicos:

- Transporte puramente advectivo, sobrepuesto a un modelo normal de flujo bidimensional.
- Transporte advectivo y dispersivo unidimensional, con inyección constante.
- Transporte advectivo y dispersivo tridimensional, con inyección puntual instantánea.
- Transporte advectivo y dispersivo en acuífero bidimensional, inyección variable en el tiempo y desde varios puntos.

Con esto deberían quedar cubiertas las necesidades mínimas para iniciar un modelo hidroquímico. Ya se han mencionado las dificultades en conocer los parámetros de dispersión y difusión, desconocimiento que hace a menudo ilusorio el tratar de utilizar programas más complejos.

Por otro lado, alguno de estos simples programas, especialmente el segundo y tercero, pueden usarse también a la inversa, es decir, como un medio, si se tienen medidas de campo adecuadas, de determinar el coeficiente de dispersión. En especial si se localiza el punto y momento en donde la concentración es .5 de la concentración inicial en la fuente.

Una vez más hay que insistir en la prudencia en el uso de estos modelos que se basan en una serie de simplificaciones físicas que a veces no pueden asumirse.

REFERENCIAS

RIFAI, M. N. E.; KAUFMAN, W. J., y TODD, D. K. (1956): *Dispersion Phenomena in Laminar Flow Through Porous Media*. University of California, I. E. R. Series 90.

OGATA, A., y BANKS, R. B. (1961): *A solution of the differential equation of longitudinal dispersion in porous media*. USGS Prof. Paper 411-A.

LENDI, A., y ZUBER, A. (1970): *Dispersion of Tracers in Underground Water Experiments*. IAEA-UNESCO. Isotope

Hidrology. Agencia Internacional de Energía Atómica, Simposio de Viena, pp. 619-649.

HASSAN, A. A.; KLEINECKE, D. C.; JOHANSON, S. J., y PIERCHALA, C. E. (1974): *Mathematical modeling of Water Quality for Water Resources Management*. Volume 2: *Development of Historic Data for the Verification of the Ground Water Quality Model of the Santa Clara-Calleguas Area, Ventura County*. California State Department of Water Resources. The Resources Agency. Distributed by National Technical Information Service, U. S. Dept. of Commerce, OB-237 372, 114 pp. 6 mapas.

HASSAN, A. A.; KLEINECKE, D. C.; JOHANSON, S. J., y PIERCHALA, C. E. (1974): *Mathematical Modeling of Water Quality for Water Resources Management*. Volume 1: *Development of Water Resources, Office of Water Research and Technology*. Distributed by National Technical Information Service, U. S. Dept. of Commerce, PB-237 371, 190 pp.

CUSTODIO, E., y LLAMAS, M. R. (1976): *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, S. A., Casanova, 220. Barcelona-11. 2 tomos, 2359 pp.

BEAR, J., y VERRUIJT, A. (1992): *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holanda, 414 pp.

NAVARRO ALVARGONZALEZ, A. (1992): *Miniprogramas (II)*. Boletín Geológico y Minero, vol. 103, núm. 5. Madrid, pp. 901-913.

Original recibido: Julio de 1992.

Original aceptado: Julio de 1992.

Reprocesado e interpretación de varias campañas de geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico.

Por J. L. GARCIA LOBON y A. GRANDA (*)

RESUMEN

Se presentan en este trabajo los resultados del proyecto *Reprocesado e interpretación de varias campañas de geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico*, con el fin de contribuir a la divulgación de los mismos, que consideramos de referencia obligada en cualquier futuro trabajo geológico-minero de carácter regional que se realice sobre la zona estudiada.

Los datos de partida fueron, básicamente, los correspondientes a los vuelos que la Junta de Energía Nuclear (JEN) realizó entre 1978 y 1981 (proyectos AR-1/78, AR-1/80 y AR-1/81) sobre extensas áreas del Macizo Hespérico, registrando la intensidad del campo magnético y espectrometría de radiación gamma natural sobre una superficie aproximada de 80.000 Km².

En la consideración de que esta información, convenientemente tratada, pudiera ser de gran utilidad para un buen número de los estudios que habitualmente realiza el ITGE, se planteó la necesidad de un proyecto que, por otro lado, cubriría en parte el vacío de cartografía magnética de ámbito nacional existente en España.

Los trabajos realizados han consistido en corregir y homogeneizar la información de partida, procesarla de forma específica para cada parámetro, plasmarla en una serie de mapas a diversas escalas, interpretarla a nivel regional, y por último generar una base de datos con todos los resultados del proceso y la interpretación.

El proyecto se ha realizado dentro de los convenios suscritos entre el ITGE y ENRESA, como parte de los estudios de ámbito regional que esta última realiza en el Macizo Hespérico.

Palabras clave: Cartografía geofísica, Magnético, Radiométrico, Macizo Hespérico, Vuelos JEN.

ABSTRACT

Represented in this report are the results of the project «Reprocesado e Interpretación de varias campañas de geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico» that we consider useful in any future regional geological-mining work to be carried out in the area studied.

The information had to do with the flights carried out by the «Junta de Energía Nuclear» (JEN), between 1978 and 1981 (projects AR-1/78, AR-1/80 and AR-1/81). These flight paths covered extensive areas of Hesperic Massif, registering the intensity of magnetic field and the spectrometry of natural gamma radiation over a surface of approximately 80,000 square kilometers.

This information could be used for quite a few surveys normally carried out by ITGE, therefore we are suggesting a project that would fill a gap in magnetic cartography now existing in Spain.

The work done consisted of correcting and homogenizing information from the start, processing every parameter in a specified way, creating a series of maps to varied scales, interpreting the regional level, and finally, from the results of these processes and their interpretation, creating a data base.

Key words: Geophysical mapping, Magnetics, Radiometrics, Hesperic Massif, JEN flights.

(*) Instituto Tecnológico Geominero de España.

(**) International Geophysical Technology, S. A.

1. INTRODUCCION

Una de las líneas de actuación más antiguas del Servicio de Geofísica del ITGE viene consistiendo en la preparación de cartografía geofísica básica, gravimétrica y magnética, a escala 1/200.000 y 1/50.000. Este tipo de cartografía es considerado fundamental como apoyo estructural para la evaluación de todo tipo de recursos naturales, y así ha sido entendido por la mayor parte de los países desarrollados, donde desde los años 50 se realizan proyectos de mapas geofísicos de cobertura nacional.

La preparación de la cartografía geofísica supone no sólo la confección de mapas a escala equivalente a la de la cartografía geológica existente, sino que dadas las características de la adquisición y procesado de datos digitales de los métodos geofísicos, implica también la formación de bases de datos susceptibles de, además de los usos corrientes, ser explotadas en ambientes gráficos integrales (GIS, paquetes de tratamiento de imágenes, etc.). Este ha sido el caso del proyecto que describimos.

En este contexto, con vistas a la obtención de una cartografía magnética a escala 1/50.000, el Servicio de Geofísica propuso a finales de 1990 la ejecución mediante concurso público del proyecto *Reprocesado e interpretación de varias campañas de geofísica aeroportada en el Macizo Hespérico*. Su ejecución ha sido llevada a cabo por International Geophysical Technology, S. A. (IGT) y Aerodat Ltd.

2. DATOS DE PARTIDA

Fueron los que se citan a continuación:

- 1) Cintas magnéticas originales con los datos registrados en los diversos vuelos. Fueron proporcionadas por ENUSA, propietaria actual de los datos.
- 2) Mapas topográficos a escala 1/200.000.
- 3) Mapas geológicos a escala 1/200.000, obtenidos en el proyecto ERA (ENRESA 1990).

Los datos geofísicos aeroportados provienen de cuatro campañas, tres llevadas a cabo por la JEN entre 1978 y 1981 y una por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) en 1987 (fig. 1).

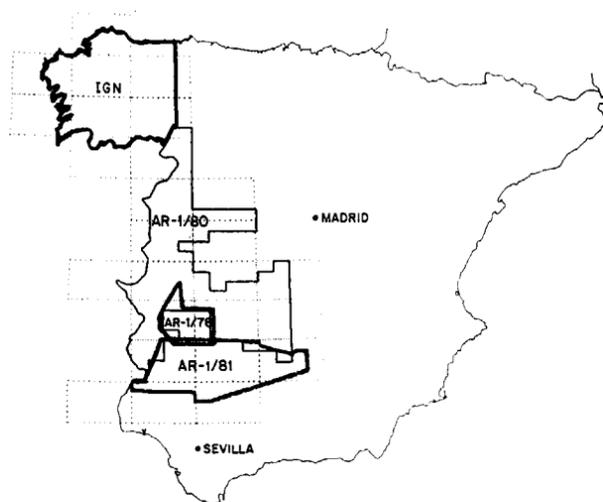


Figura 1.—Zonas cubiertas por los datos reprocesados.

JEN AR-1/78

La campaña fue realizada por HUNTING sobre unos 5.600 Km² en la zona de Don Benito. El espaciado entre líneas de vuelo fue de 1 Km y la dirección aproximada N30E. Se volaron líneas de control cada 14 Km según el perímetro de la zona (ver fig. 2).

El intervalo de registro fue de 1 segundo, utilizando un magnetómetro de protones (G803) situado a una altura de 120 metros sobre el terreno. La navegación fue visual. El volumen del detector del espectrómetro de rayos gamma fue 1024 pulgadas cúbicas. Los resultados se presentaron en forma de mapas de isovalores de campo magnético total corregido por el Campo Geomagnético Internacional de Referencia de 1978 (IGRF/78), cuatro canales de radiometría (cuentas totales, K, U, Th) en cuentas por segundo y una serie de ratios radiométricos. Estos mapas se confeccionaron a escalas 1/50.000 y 1/200.000.

JEN AR-1/80

Este proyecto fue realizado por GEODATA sobre unos 55.000 Km² (fig. 2) con unas características idénticas al proyecto anterior. El espectrómetro de rayos gamma tenía en este caso un volumen de 1855 pulgadas cúbicas. Se presen-

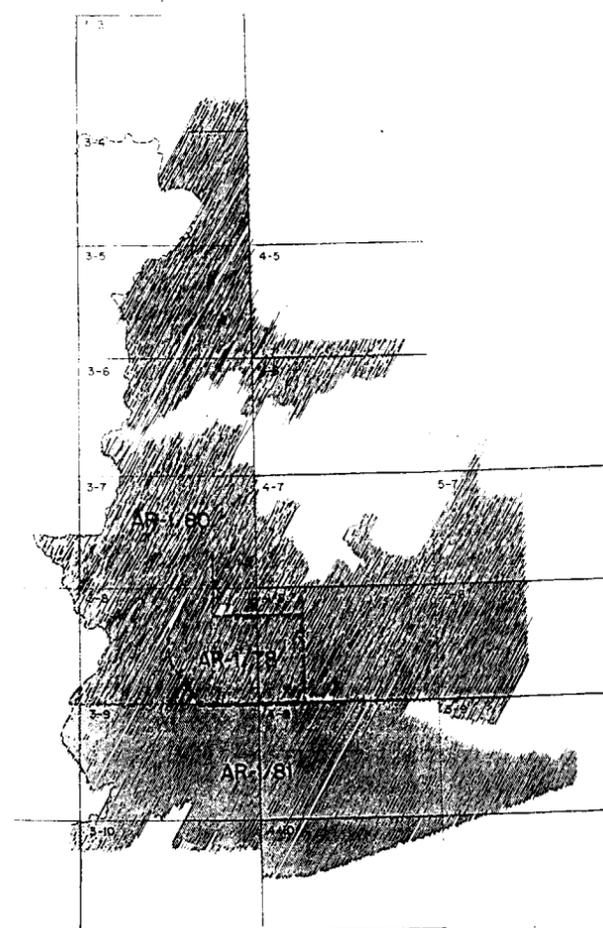


Figura 2.—Líneas de vuelo de los proyectos de la JEN.

taron en forma de mapas de isovalores a escala 1/50.000 el campo magnético total corregido por el IGRF/75 y los cuatro canales de radiometría en unidades de concentración equivalente. Los factores de conversión utilizados fueron 80,03 cps/%K, 7,86 cps/ppm eU y 5,14 cps/ppm eTh.

JEN AR-1/81

También realizado por GEODATA sobre unos 22.000 Km² usando la misma instrumentación, dirección de vuelo, espaciados y alturas medias que en el vuelo anterior.

Los resultados se presentaron como mapas de isovalores de campo magnético total corregido por el IGRF/75 y radiometría a escala 1/50.000.

Las unidades para estos últimos fueron concentraciones equivalentes terreno con factores de conversión de 85 cps/%K, 8 cps/ppm eU y 5,5 cps/ppm eTh.

IGN - 1987

Se trata de un vuelo exclusivamente magnetométrico realizado por el IGN sobre el territorio peninsular con un espaciado entre líneas de 10 Kms y una altura barométrica constante de 3.000 metros. Se usó un magnetómetro de efecto Overhauser. Los resultados se presentaron como mapas de isovalores del campo magnético total tras la sustracción del IGRF/85. La escala de los mapas es 1/1.000.000 y 1/500.000 con un intervalo de contorno mínimo de 2 nT.

De esta campaña se utilizaron en el proyecto exclusivamente los datos correspondientes a Galicia, lo que representa una superficie aproximada de 37.500 Km².

La localización de las líneas de vuelo utilizadas se indica en la figura 3.

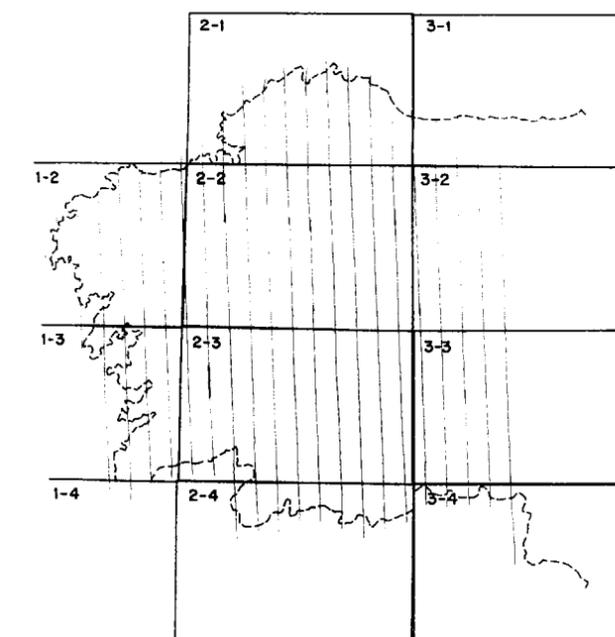


Figura 3.—Líneas de vuelo del proyecto del IGN en la zona de Galicia.

Base geográfica digital

Se elaboró a partir de los planos topográficos a escala 1/200.000 e incluye ríos, carreteras principales, límites provinciales y ciudades significativas. Esta base se representó posteriormente en todos los planos resultantes del estudio.

Base geológica

Se elaboró a partir de la información proporcionada por ENRESA (proyecto ERA - Estudio de las rocas plutónicas del Macizo Hespérico. Junio 1990) en forma de mapas a escala 1/200.000.

Las unidades seleccionadas para su digitalización y posterior inclusión como base geológica para todos los planos resultantes del proyecto fueron:

- Rocas plutónicas.
- Encajante metamórfico.
- Cobertera Cenozoica.

3. RESULTADOS DEL PROYECTO

El conjunto de datos resultantes del procesamiento realizado se agrupa en tres tipos de productos:

- Planos.
- Base de datos.
- Sistema de procesamiento de imágenes en tiempo real.

La presentación de los resultados en forma de planos a todo color incluye en todos los casos una base geológica y referencias geográficas suficientes, así como leyenda explicativa del origen de la información y de los procesos realizados. Se han editado los planos que se indican a continuación (fig. 4).

- A escala 1/500.000 toda el área de los vuelos de la JEN.
- A escala 1/200.000 seis zonas de las que las números 1 y 2 corresponden a Galicia.
- A escala 1/100.000 diez subzonas que se han hecho coincidir con hojas del MTN a escala 1/200.000.
- A escala 1/50.000 ciento setenta planos que corresponden a otras tantas hojas del MTN a la misma escala.

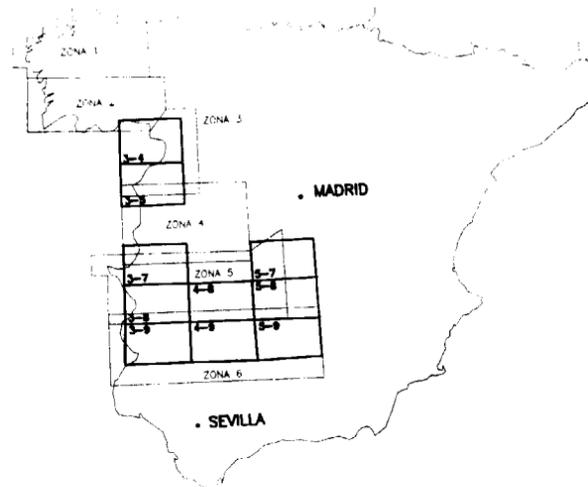


Figura 4.—Distribución de planos editados a escalas 1/200.000 y 1/100.000.

Para estas últimas se ha representado exclusivamente la intensidad del campo magnético según formato establecido por el ITGE para el mapa magnético de España.

Se han elaborado seis tipos de planos en color para cada una de las zonas a las escalas 1/500.000, 1/200.000 (salvo Galicia donde no se incluyen los mapas tipo 5 y 6) y 1/100.000. Son los siguientes:

1. Campo magnético total reducido al polo.
2. Gradiente magnético vertical reducido al polo.
3. Susceptibilidad magnética aparente.
4. Deconvolución de Euler (4 índices).
5. Radiométrico ternario.
6. Interpretación.

Todos estos mapas incluyen las bases geográfica y geológica citadas al final del epígrafe 2. Los mapas tipo 1, 2, 3 y 5 son coloreados con la técnica de igual área (histogram equalization). En los mapas tipo 1 y 2 a escala 1/100.000 se incluyen además líneas de contorno.

La base de datos contiene los ficheros/perfil corregidos y la distribución de los datos geofísicos en malla cuadrada, tanto de los ya nivelados como de los resultantes de los diversos pro-

cesos realizados. Asimismo incluye la información geológica y geográfica digitalizada y la interpretación litoestructural tal como aparece en los mapas. Además se ha diseñado con una estructura abierta que posibilita la futura incorporación de cualquier tipo de información que se considere de interés.

Como parte de los medios de explotación de la base de datos se incluye el programa AXIS para procesamiento de imágenes en tiempo real sobre PC y los correspondientes ficheros con los datos resultantes del Proyecto. Este programa permite la visualización en pantalla de los mapas anteriores con utilidades adicionales tales como: superposición de hasta tres imágenes diferentes mediante colores e isolíneas, cambio de la distribución de colores, generación instantánea de planos de sombras, ampliación de zonas seleccionadas, etc.

4. PROCESO DE DATOS

El posicionamiento de las líneas de vuelo viene dado en las cintas originales por coordenadas geográficas longitud/latitud o UTM. Las diversas áreas integradas en este estudio se localizan en las zonas UTM 29S, 29T, 30S y 30T. El meridiano 6° O de Greenwich separa las zonas 29 y 30, dividiendo aproximadamente por la mitad el área de trabajo.

Los diversos productos a obtener con los datos de este proyecto exigen la distribución previa de los mismos en malla regular. Por ello, todas las coordenadas se han referido a una sola zona UTM, en este caso la 30. Los datos originalmente registrados en esta zona no se han modificado. Los referidos a coordenadas geográficas se han transformado en coordenadas UTM de la zona 30, lo mismo que aquellos referidos a la zona 29.

Todos los mapas muestran la malla de coordenadas UTM zona 30 con marcas de posición cada 50 Kms (1/500.000), 20 Kms. (1/200.000), 10 Kms (1/100.000) y 5 Kms (1/50.000). Los mapas al oeste del meridiano 6° O muestran también la malla de coordenadas UTM de la zona 29.

Los mapas a escala 1/500.000 y 1/200.000 contienen áreas de límites irregulares que no se ajustan a los de las colecciones del MTN. En

cambio los mapas a escala 1/100.000 y 1/50.000 coinciden en sus límites con los de las hojas 1/200.000 y 1/50.000 respectivamente (fig. 4). La base geográfica de los mapas se ha elaborado mediante digitalización de límites nacionales y provinciales, ríos y carreteras principales y ciudades importantes, a partir de las hojas topográficas a escala 1/200.000. Para cualquier tipo de mapa esta base se presenta de acuerdo con los límites de aquél y a su misma escala.

Los títulos y leyendas incluyen mapas índice de localización, mapas con los límites de las campañas originales, bloques de texto describiendo el procesamiento y una leyenda específica de cada tipo de mapa.

La base geológica que aparece en los mapas 1/500.000, 1/200.000 y 1/100.000 fue digitalizada a partir de los mapas proporcionados por ENRESA. Los contactos geológicos y fallas principales se refirieron a un origen local para cada hoja 1/200.000. Las unidades diferenciadas han sido: rocas intrusivas, metasedimentos y cobertera Cenozoica. La 1.ª y la 3.ª se definieron con fronteras cerradas puesto que iban a representarse en los mapas finales mediante trama. La geología digitalizada de las 26 hojas a escala 1/200.000 incluidas en la zona del estudio se representó en un solo mapa de síntesis referido a la zona 30 UTM sobre el que se corrigieron errores menores normalmente en la frontera entre las diversas hojas.

4.1. Campo magnético total

El esquema general seguido en el procesamiento de los datos magnetométricos es el que se indica en la figura 5.

Aunque la traza de las líneas de vuelo no se muestra en ningún mapa, salvo en la colección a escala 1/50.000, su recuperación de las cintas originales es el punto de partida para el conjunto de posteriores operaciones a realizar. La traza del vuelo se leyó de las cintas originales cuyas referencias eran las siguientes:

Campaña	Referencia
AR-1/78..	UTM - Zona 30
AR-1/80..	Latitud/longitud
AR-1/81..	Latitud/longitud
IGN-1987	UTM - Zona 29

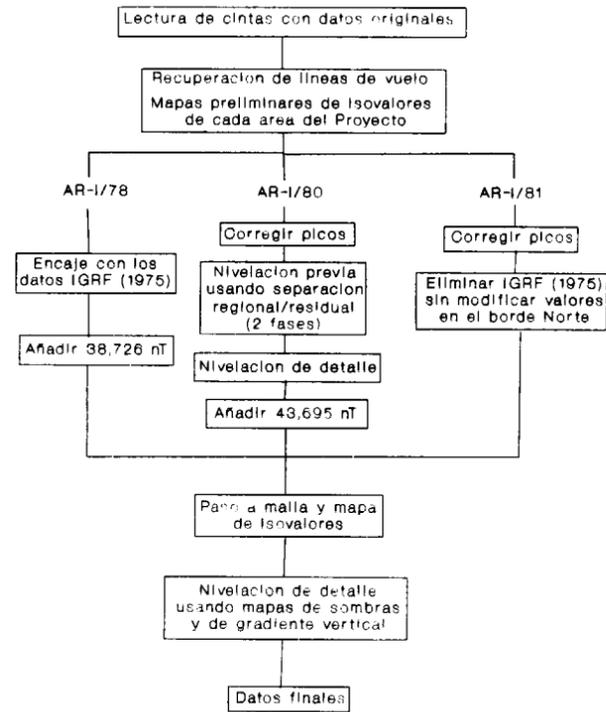


Figura 5.—Diagrama de flujo mostrando el proceso seguido para nivelar los datos de campo magnético total de 1 km de espaciado.

Los datos de los vuelos AR-1/78 e IG/87 no presentan vacíos de información (gaps). Algunos perfiles del vuelo AR-1/80 muestran gaps regulares sobre una extensión del 20 por 100 de la línea (5 cm de línea a escala 1/200.000 es seguido por 1 cm sin datos). Este hecho se ilustra en la figura 6 que muestra perfiles seriados con los datos magnéticos originales de parte del área cubierta por el proyecto AR-1/80. La escala vertical es 10nt/mm. Estos gaps se corrigieron por interpolación previo análisis detallado de las tendencias en los perfiles del entorno. De este modo se evitó la generación de posibles falsas anomalías.

Las líneas del vuelo AR-1/81 no contenían gaps pero sí secciones con líneas dobladas que se borraron.

El recuento final de las líneas de vuelo recuperadas quedó como sigue:

Campaña	
AR-1/78..	5.659 Kms
AR-1/80..	55.884 Kms
AR-1/81..	22.326 Kms
IGN	4.079 Kms

La cobertura total de los vuelos de la JEN supone por tanto 83.869 Kms de línea.

Tras la recuperación de las trazas de los vuelos, la etapa siguiente en un proceso standard es la distribución de los valores en malla regular, siempre que los datos aeromagnéticos de partida estén corregidos y nivelados. Desgraciadamente los datos de los vuelos de la JEN requirieron un considerable esfuerzo de corrección y nivelación para construir una malla consistente con un intervalo de contorno mínimo de 2nT. Esto implicó nivelar con una precisión de 1nT, o incluso superior.

Una nivelación de calidad es fundamental y afecta a un considerable número de productos que se obtienen por vía de la transformada rápida de Fourier (FFT) a partir de los valores distribuidos en malla.

Los datos AR-1/78 eran de buena calidad. Su procesado original los había corregido por el IGFR/78. Puesto que las campañas AR-1/80 y AR-1/81 se corrigieron utilizando el IGRF/75, la AR-1/78 fue renivelada por la sustracción de una superficie plana con una pendiente ligera de unos pocos nT sobre el área de la misma. Tras la suma de 38.726 nT se consiguió el ajuste de los datos de esta campaña con los correspondientes a los otros vuelos.

Los archivos perfil del vuelo AR-1/80 contenían numerosísimos errores. Además de los gaps en la traza del vuelo ya citados, lecturas puntuales muy elevadas (spikes) solían aparecer al comienzo de dichos gaps y, sorprendentemente, los datos prácticamente no estaban nivelados. En la figura 7 se presenta un mapa de isovalores de dichos datos brutos con un intervalo de contorno de 2 nT. El área a la que corresponden estos valores es la misma que la de la figura 6. Este tipo de resultados son característicos de registros brutos sin corregir ni nivelar.

Para eliminar estos defectos se calculó una malla preliminar efectuándose una separación regional/residual por filtrado digital. Por observación del mapa residual se seleccionaron las líneas que mostraban errores de nivelación y se borraron, repitiéndose el proceso. La diferencia entre los dos mapas residuales obtenidos antes y después del borrado de las líneas citadas se utilizó para determinar los saltos de nivel para el conjunto de datos. Con este procedimiento

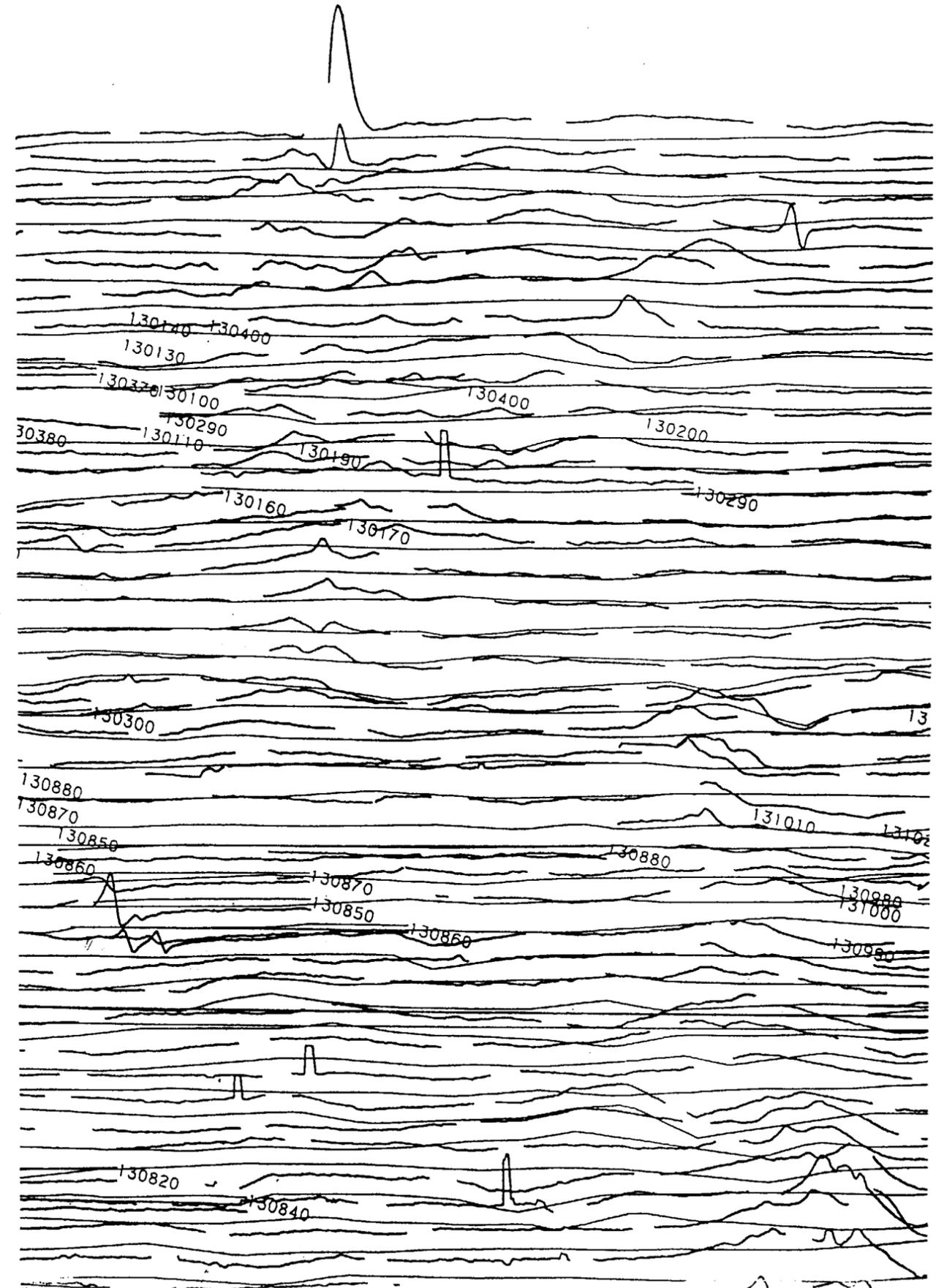


Figura 6.—Errores característicos en los datos magnéticos originales (picos y zonas sin información).

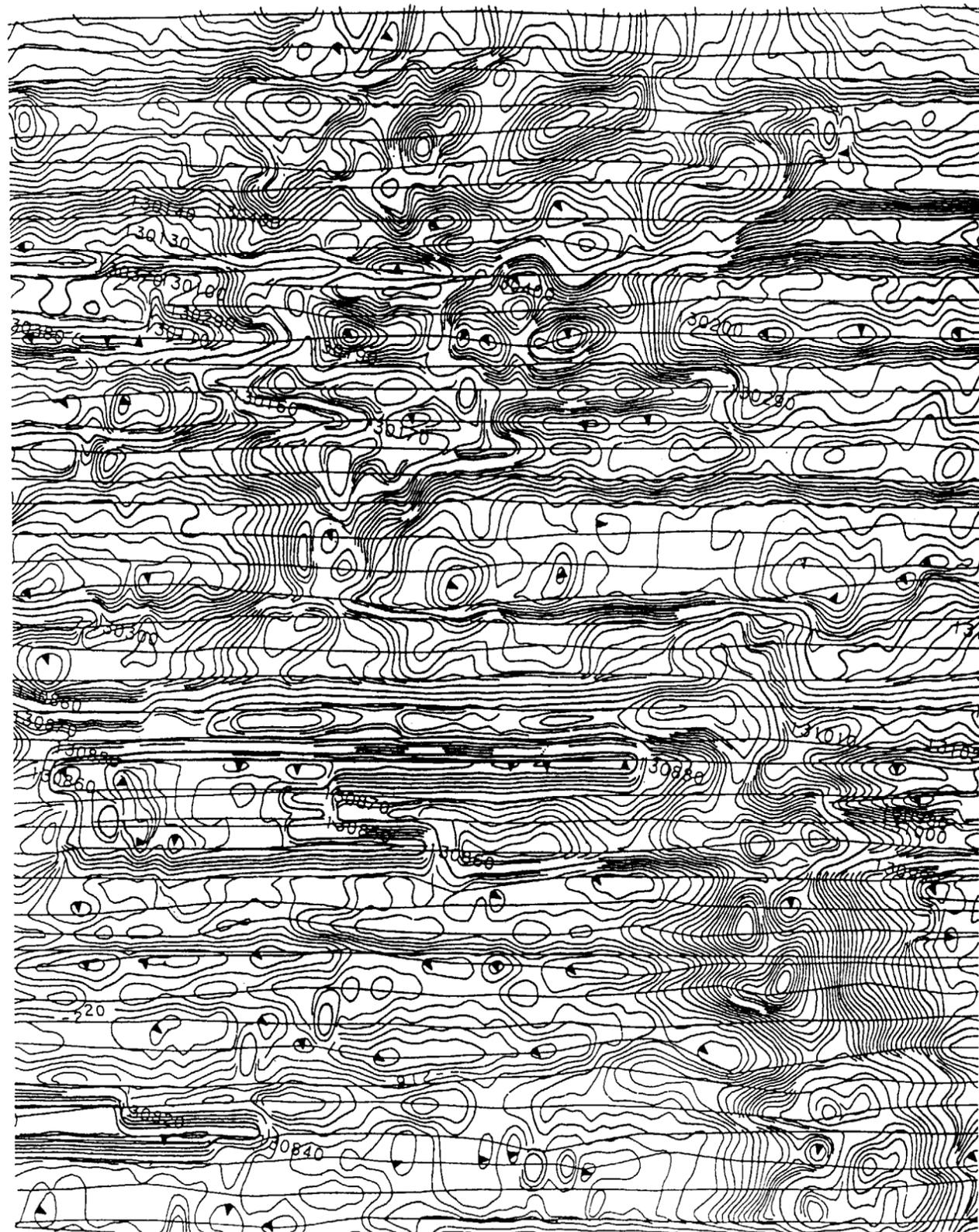


Figura 7.—Errores de nivelación en los datos magnéticos originales. Corresponden a la misma zona de la figura 6.

se corrigieron la mayoría de los errores. Pequeñas correcciones de nivel manuales afinaron el proceso. Tras añadir 43.695 nT a los datos AR-1/80 se consiguió el ajuste de éstos con los de los proyectos AR-1/78 y AR-1/81.

Las cintas de la campaña AR-1/81 contenían valores del campo magnético total. De ellos se sustrajo el IGRF/75 con la precaución de que los valores a lo largo del borde norte de la zona cubierta por este vuelo permanecieran inalterados. De este modo se obtuvo una población homogénea y corregida de valores del campo magnético total para el conjunto de las zonas cubiertas por los vuelos de la JEN. Como control adicional se plotearon perfiles seriados para detectar spikes, que se eliminaron mediante filtros pasa-baja.

Los datos resultantes de las tres campañas de la JEN fueron finalmente controlados mediante la representación a escala 1/500.000 del plano de isovalores del gradiente magnético vertical calculado a partir de los datos anteriores, y mediante mapas de sombras con dirección de iluminación paralela y perpendicular a la de las líneas de vuelo.

Finalmente, los datos/perfil se interpolaron en malla cuadrada de 200×200 m, mediante una modificación del método Akima's spline. Esta malla constituye el punto de partida de todos los procesos específicos que se detallarán en próximos epígrafes.

4.2. Espectrometría de rayos Gamma

Los datos perfil de los canales de cuentas totales, potasio, uranio y torio fueron leídos de las cintas de los vuelos de la JEN. De acuerdo con las condiciones impuestas por ENUSA en la cesión de los datos, no se procesaron individualmente ni los valores de U ni los de cuentas totales.

El consultor de las campañas AR-1/80 y AR-1/81 fue el mismo y los resultados parecen homogéneos. Se presentaron en unidades de concentración equivalente. Por su parte los datos de la campaña AR-1/78 se expresaron en cuentas/segundo. Teniendo en cuenta el volumen del cristal detector utilizado, estos datos se transfor-

maron a unidades de concentración usando los siguientes factores de conversión:

42.5 cps/%K, 5.3 cps/ppm eU, 2.75 cps/ppm eTh

Los problemas de gaps, spikes y errores de nivelación citados para la magnetometría también se detectaron en los datos radiométricos. Su corrección se efectuó utilizando procedimientos similares y los valores radiométricos corregidos se distribuyeron en una malla regular de 200×200 m. Las tres mallas finales (K, U, TH) forman la base para la obtención del Mapa Radiométrico Ternario que constituye el documento único de esta naturaleza en los planos finales.

Este plano constituye una alternativa a la presentación usual de las medidas radiométricas por medio de ratios aprovechando la capacidad de los plotters de color de gran formato y alta resolución. El proceso para la producción de tales mapas queda descrito en la publicación de BROOME et al. (1987). Consiste en representar mediante diferente color la contribución relativa de cada elemento radiactivo: potasio (magenta), uranio (cian) y torio (amarillo). Presenta simultáneamente una doble información: concentración relativa de cada elemento, de acuerdo con la proporción de cada color, y amplitud de la radiación total en función de la intensidad de color. La asignación de color se realiza mediante aplicación de doble ecualización de histograma.

4.3. Procesado de datos magnetométricos mediante la función FFT

La aplicación de la transformada rápida de Fourier a los datos magnetométricos nivelados, corregidos y distribuidos en malla regular permite la obtención de tres tipos de mapas: los de campo magnético total reducido al polo, gradiente magnético vertical y la susceptibilidad magnética aparente. El proceso conlleva la aplicación a los valores en malla de una serie de operadores de filtrado pasa-baja, reducción al polo, primera derivada vertical, continuación de campo hacia abajo y corrección por el espectro de un prisma vertical finito. El proceso se sintetiza en tres fases:

1. Transformada de Fourier 2D de la malla de valores de campo magnético total:

$$F(u, v) = \int \int f(x, y) \exp[-2\pi i(ux + vy)] dx dy \quad [1]$$

2. Multiplicación en el dominio de la frecuencia de los datos transformados por uno o más de los operadores citados:

$$G(u, v) = P(u, v) F(u, v)$$

3. Transformada inversa de $G(u, v)$ obteniendo de nuevo la función espacial $g(x, y)$. La transformada inversa viene dada reemplazando en la ecuación [1] i por $-i$.

Los filtros utilizados han sido los siguientes:

- Filtro pasa-baja (Hanning): este filtrado es necesario para la eliminación de las frecuencias elevadas que pueden ser amplificadas de manera importante en etapas sucesivas del proceso. Su función de transferencia es:

$$P(u, v) = \cos \left(\left[\frac{\pi}{2} \right] \times \left[1 - \frac{(r-r_2)}{(r_1-r_2)} \right] \right)$$

$$r^2 = u^2 + v^2$$

r_1 = límite inferior de la banda de frecuencias.

r_2 = límite superior de la banda de frecuencias.

Se trata de un filtro simétrico ya que actúa de igual forma en todas direcciones. r es la frecuencia radial y sus valores en nuestro caso fueron:

	r_1	r_2
Vuelos JEN.	0,75 ciclos/Km..	1,125 ciclos/Km.
Vuelo IGN ..	0,1 ciclos/Km...	0,375 ciclos/Km.

- Reducción al polo: el operador es:

$$P(u, v) = r / [cr + i(au + bv)],$$

donde a , b y c son los cosenos correspondientes a la dirección del campo magnético local. En nuestro caso, se ha considerado una inclinación de 55.3° y una declinación de 5.5° , con lo que los valores utilizados para estos parámetros han sido: $a = 0.0096$, $b = 0.995$ y $c = 0.574$.

- Continuación de campo hacia abajo: consiste en calcular los valores del campo magnético en un plano situado a diferente distancia, respecto a la fuente, que el plano de observación. La función de transferencia es el filtro $P(u, v) = \exp(2\pi rz)$ donde z es la distancia de continuación en metros. Resulta evidente del carácter exponencial del opera-

tor que la parte de alta frecuencia del espectro resulta fuertemente amplificada, por lo que es preciso el previo filtrado pasa-baja para evitar saturaciones.

- Primera derivada vertical: El operador empleado es $P(u, v) = 2\pi r$. El comportamiento de este filtro es más estable que el anterior pero la amplificación de las frecuencias elevadas requiere el procesado previo mediante un filtro pasa-baja.

- Susceptibilidad magnética aparente: Cuando el modelo geológico puede simplificarse hasta quedar reducido a un conjunto de prismas verticales de sección cuadrada, susceptibilidad uniforme y de gran extensión en profundidad, la susceptibilidad aparente de tales prismas puede determinarse por la aplicación de filtros sucesivos para corregir los siguientes efectos:

- Altura del sensor respecto al plano donde se localiza el origen de la señal.
- Ausencia remanencia. Inducción exclusivamente vertical.
- Forma de la anomalía magnética para un cuerpo de tipo prismático.

Las dos primeras correcciones se han realizado por reducir al polo y continuación de campo hacia abajo, mientras que la última supone eliminar del espectro resultante, el espectro suma de una colección de prismas ideales de 200×200 m de sección, verticales y de extensión infinita hacia abajo.

4.4. Deconvolución de Euler

Se trata de un procedimiento semiautomático de interpretación cuantitativa de datos magnéticos distribuidos en malla regular. El procedimiento determina la localización y profundidad de los elementos litológicos o estructurales que producen las anomalías magnéticas, tales como: fallas, contactos, diques, etc. No proporciona indicación de buzamientos. Este procesado se basa en el hecho de que las anomalías de campo magnético total H responden a una ecuación del tipo $H = G/r^n$ donde r es la distancia del borde superior de la fuente al plano de observación y G es función de su volumen, geometría y suscepti-

bilidad magnética. El exponente n depende de la geometría de la fuente. Por ejemplo, es 1 para un dique y 2 para una chimenea vertical.

La ecuación anterior es homogénea de grado n por lo que satisface la ecuación de Euler:

$$(x-x_0)dH/dx + (y-y_0)dH/dy - z_0dH/dz = -nH$$

donde x_0 , y_0 , z_0 son las coordenadas de la fuente, mientras que x , y con las coordenadas de cualquier punto en el plano de observación. Las derivadas parciales se calculan en cada celda utilizando métodos estandar.

En teoría la aplicación de la ecuación de Euler sobre 4 celdas proporciona un sistema de 4 ecuaciones con 4 incógnitas, siendo la solución la localización de la fuente y su profundidad supuesto un cierto valor de n . En la práctica se sobredetermina el sistema y se obtiene una solución aproximada por mínimos cuadrados. En nuestro caso se aplicó un esquema de inversión de 8×8 celdas (64 ecuaciones) sobre el conjunto de la malla completa para valores del índice estructural $n = 0, 1, 2$ y 3 . Las soluciones, localización y profundidad, se han representado mediante símbolos de dimensiones proporcionales a la profundidad de la fuente. La simbología utilizada ha sido:

n	Modelo	Simbolo
0	Contacto o falla	Círculo
1	Dique vertical	Cuadrado
2	Chimenea vertical	Diamante
3	Esfera	Triángulo

La dimensión característica para cada símbolo es el diámetro, el lado, la diagonal y la base, y representa la separación aparente entre la fuente y el sensor. La profundidad interpretada es por tanto esta longitud menos la altura de vuelo.

Parte de las soluciones obtenidas de este proceso no son realistas y por ello la práctica habitual consiste en aplicar factores de selección en función del error standard de las soluciones. Resumimos a continuación las características de la operación en nuestro caso:

Parámetro	JEN	IGN
Tamaño celda	200 m	1.400 m
Paquete celdas	8×8	8×8
Desviación máxima	25 %	30 %
Ratio de profundidad	4	4
Mínima profundidad	120 m	3 Km
Máxima profundidad	3 Km	100 Km

5. INTERPRETACION

No se pretende aquí otra cosa que una breve descripción cualitativa de la correlación entre las imágenes geofísicas contenidas en los mapas generados en el procesado de los vuelos de la JEN y la cartografía geológica utilizada en el proyecto, procurando extraer inferencias geológicas de cada uno de los documentos resultantes del estudio geofísico.

Se entiende que el conocimiento geológico actual de buena parte del área de trabajo es más detallado de lo que se obtendría con la interpretación de una campaña geofísica aeroportada de carácter regional como la de los vuelos de la JEN. Tampoco era la interpretación de detalle el objetivo prioritario del proyecto. En todo caso determinados datos de los obtenidos en este trabajo son de indudable interés para la comprensión o explicación de algunos aspectos litológicos y estructurales que suscitan discusión entre los geólogos.

El reprocesado de los datos magnéticos y radiométricos ha dado origen a una serie de mapas que complementan la cartografía geológica existente y ponen de relieve la existencia de aspectos poco claros o no plenamente comprendidos. La naturaleza del basamento rocoso en zonas de cobertera Cenozoica, que constituye alrededor de un 15 por 100 de la cartografía y la diferenciación de granitos por su respuesta geofísica son dos posibles contribuciones del Proyecto.

De los cinco tipos de mapas en los que se ha basado la interpretación, tres son los de mayor utilidad: el gradiente magnético vertical, la deconvolución de Euler y el mapa radiométrico ternario.

De cualquier modo cada uno de los documentos obtenidos en este trabajo tiene una validez característica respecto a alguno de los objetivos

del mismo. Las ideas generales con que tales mapas se han utilizado son las que detallamos en los próximos párrafos.

5.1. Campo magnético total

Las variaciones de los valores de campo total están comprendidos en un entorno de 2.000 nT, con el 93 por 100 de los datos dentro del intervalo de 43.360 a 43.560 nT. El 63 por 100 de los valores se desvían en ± 30 nT del valor medio de 43.460 nT. La distribución de valores del campo magnético total sugiere las siguientes divisiones regionales de N a S:

- 1) Zona de reducida actividad magnética, con valores bajos sobre los sedimentos Silurianos en el extremo norte del área de estudio. La amplitud media es de 43.440 nT. Existen anomalías ocasionales de carácter lineal que responden a sedimentos Ordovícicos de mayor susceptibilidad magnética.
- 2) Zona de muy bajo gradiente y amplitudes relativamente altas en los granitos de Salamanca. Amplitudes medias entre 43.470 y 43.485 nT.
- 3) El resto de la zona Centro Ibérica muestra una cierta variedad de estilos y tendencias magnéticas. En general los granitos son áreas de bajo relieve con amplitudes diferentes y rodeadas por arcos de gradiente elevado. La falla de Plasencia es el rasgo regional más relevante.

El borde sur de la zona Centro Ibérica parece estar definido por una serie de macizos graníticos (Alburquerque, Villar del Rey, Mérida, La Haba y Los Pedroches) que se presentan como zonas de bajo gradiente. En algunos casos (Villar del Rey, Mérida y La Haba) las zonas de bajo relieve magnético son más extensas que lo indicado por la cartografía geológica (fig. 8).

- 4) La zona de Ossa-Morena presenta un relieve magnético elevado con importantes ejes magnéticos paralelos y uniformes sobre grandes distancias. Las orientaciones son ONO/SSE en la zona O del área de estudio. Las estructuras magnéticas son más irregulares sobre el anticlinorio Olivenza-Monasterio.

Los mapas de campo total contienen información de amplitud útil para la diferenciación de zonas con distintos valores de fondo. Esto es particularmente interesante en áreas de bajo relieve magnético tales como los sedimentos Silurianos y los granitos de Salamanca. Estas dos regiones muestran una diferencia de amplitud de aproximadamente 40 nT. Una diferencia similar existe entre el batolito de Los Pedroches y la extensión Pedroches Oeste.

Para un mayor detalle en lo que respecta a la interpretación nos remitimos a la Memoria del Proyecto que contiene una serie de conclusiones generales acerca de la correlación entre los datos magnetométricos y la cartografía geológica a escala 1/200.000 del Proyecto ERA realizado por ENRESA.

5.2. Gradiente magnético vertical

La utilidad de este parámetro se basa en el hecho de que la línea de contorno cero de un mapa de gradiente vertical localiza de forma aproximada los bordes de cuerpos tabulares subverticales. En circunstancias ideales, el gradiente vertical proporciona la mejor indicación respecto a la localización de fuentes magnéticas próximas a la superficie. En la práctica, este concepto no es aplicable a cuerpos de muy reducido espesor o muy potentes y tampoco cuando éstos presentan una disposición subhorizontal. En este último caso el gradiente es máximo cerca de los bordes y no muestra ninguna respuesta en el centro del cuerpo. La distribución de isovalores en el plano del gradiente magnético vertical aporta información respecto a la profundidad a que se localiza la fuente y también respecto a su buzamiento.

En el conjunto del área estudiada el gradiente vertical muestra un rango de variación de ± 20 nT/m, pero el 89 por 100 de los datos se sitúan dentro del entorno de ± 0.475 nT/m y el 67 por 100 se restringe a ± 0.1 nT/m. De acuerdo con esta distribución, líneas de contorno como la de 0.05 y 0.25 nT/m pueden considerarse indicativas respecto a los límites de fuentes magnéticas débiles e intensas respectivamente.

El gradiente vertical suele ofrecer buenas res-

Figura 8.—Campo magnético total. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

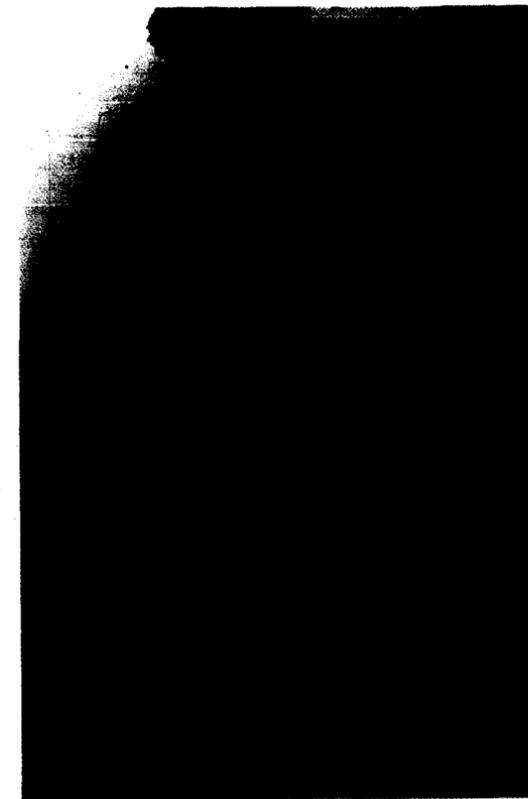


Figura 10.—Mapa radiométrico ternario. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

Figura 9.—Gradiente magnético vertical. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

Figura 8.—Campo magnético total. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

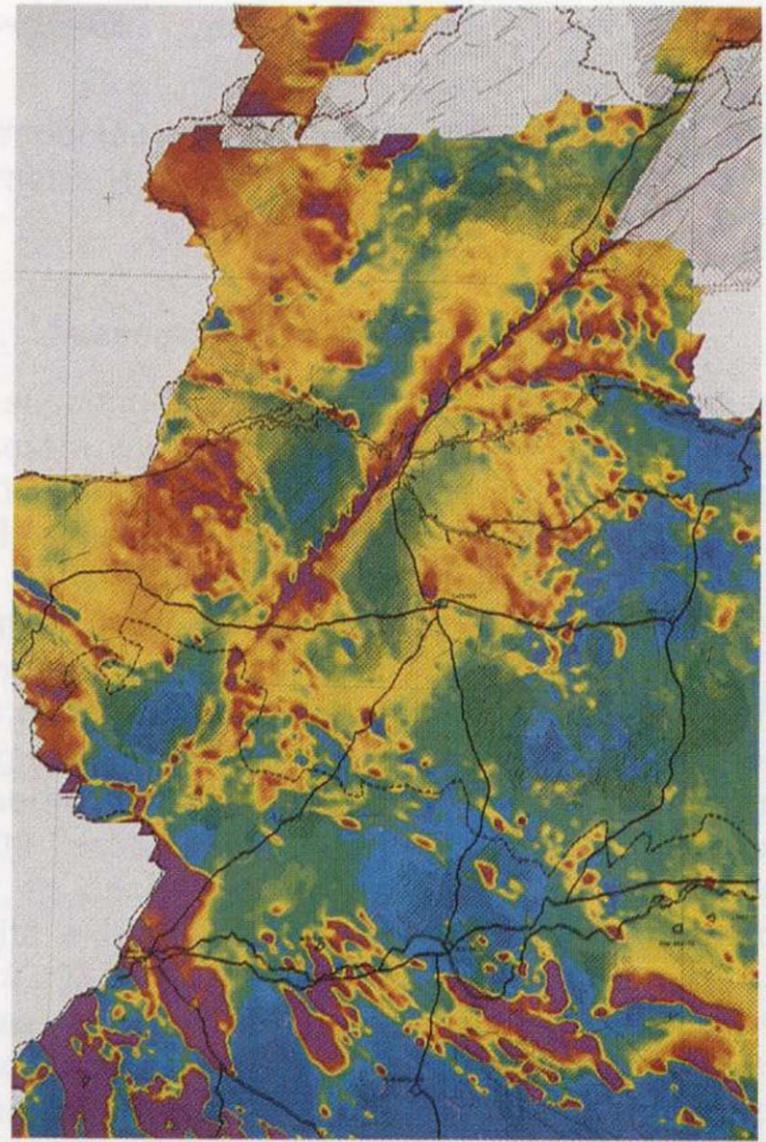


Figura 10.—Mapa radiométrico ternario. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

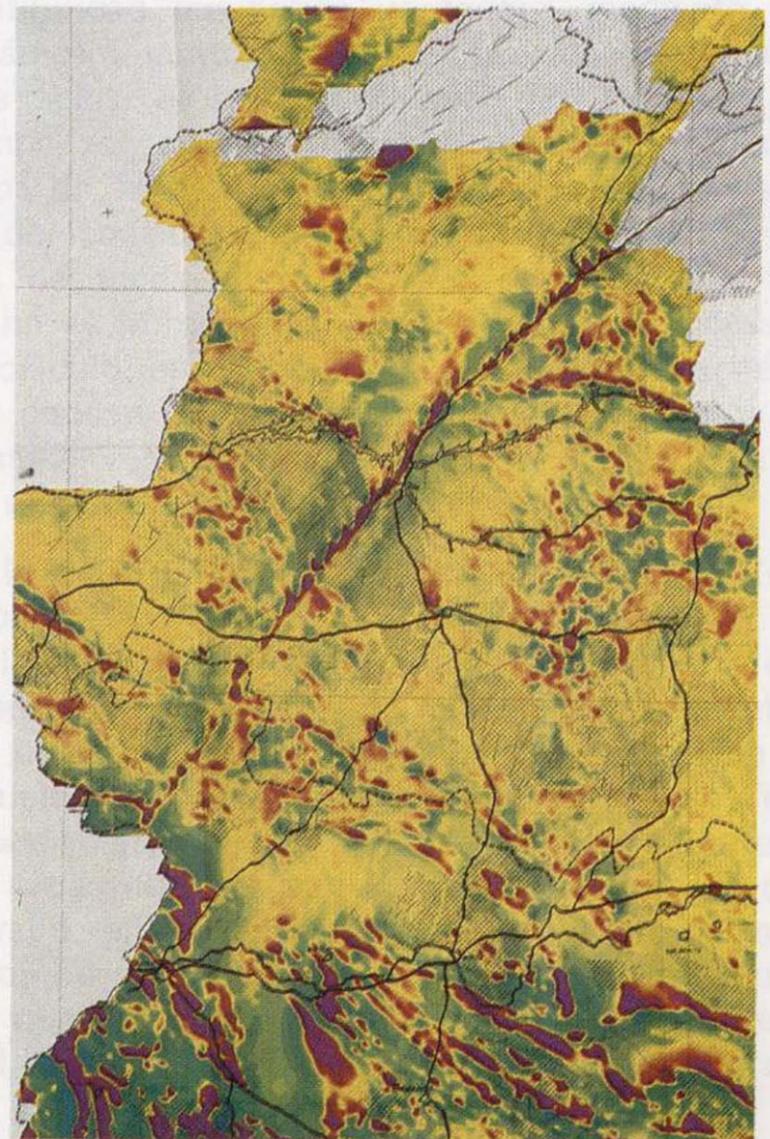


Figura 9.—Gradiente magnético vertical. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

puestas en el caso de fallas que cortan estructuras lineales.

Todos los granitos de la zona Centro Ibérica son zonas sin relieve desde el punto de vista del gradiente vertical. Usualmente el borde del macizo coincide con anomalías en la distribución de los valores del gradiente. En algunos casos esta correspondencia es excelente. Por ejemplo los granitos de Cabeza Araya, La Haba y Los Pedros (fig. 9). En Ossa-Morena, donde los granitos pueden incluir volcánicas (Macizo de Barcarrota), el gradiente vertical muestra áreas de gran amplitud, superiores a 1 nT/m.

Allí donde los sedimentos Cenozoicos no magnéticos cubren parte de los granitos, las zonas de bajo relieve de gradiente vertical proporcionan la mejor indicación sobre posibles extensiones de estos granitos bajo los sedimentos. No obstante, algunas áreas cartografiadas como metasedimentos también se manifiestan como zonas de bajo gradiente magnético.

Muchas estructuras del Complejo Esquisto Grauwáquico (Los Sinclinales de Cañaverál, Puebla de Don Rodrigo y Almadén, los Anticlinales de Valdelacasa, Ibor y Villarta-Navalpino y el Domo de Abenojar) presentan una expresión clara en los mapas del gradiente vertical.

Las anomalías más intensas del gradiente vertical se localizan en la zona de Ossa-Morena. Un cuidadoso análisis de las mismas en relación con cartografía geológica de más detalle que la empleada en este Proyecto, podría ser de mucho interés en áreas de potencial minero.

5.3. Mapa radiométrico ternario

En estos mapas pueden observarse una serie de anomalías radiométricas localizadas donde la intensidad de color es apreciablemente superior a los niveles de fondo. Estos altos radiométricos pueden ser clasificados en términos relativos a la contribución de cada uno de los elementos U, Th, K en tales anomalías.

La mayor parte de estas anomalías se localizan sobre granitos y muestran variaciones significativas incluso dentro de unidades litológicas que la cartografía considera como homogéneas.

Las zonas recubiertas quedan caracterizadas por

la reducida intensidad de los colores del Mapa Ternario (fig. 10).

5.4. Susceptibilidad magnética aparente

La susceptibilidad magnética aparente calculada muestra un rango de variación de -0.0025 a 0.015 emu. Recordemos que la susceptibilidad es la propiedad física que expresa la relación entre el campo magnético inducido (anomalía de campo total) al campo magnético ambiente o normal. La susceptibilidad magnética de las rocas depende de su contenido en minerales ferromagnéticos, básicamente magnetita. Como regla general la susceptibilidad es aproximadamente 0.003 veces el porcentaje en volumen de magnetita, es decir, una roca con un 1 por 100 de magnetita exhibirá una susceptibilidad de alrededor de 0.003 emu. También como regla general, las rocas ígneas básicas y ultrabásicas presentan susceptibilidades (0.005 a 0.01 emus) superiores a las de las rocas sedimentarias y metamórficas (0.00002 a 0.002 emus). Un valor medio característico para los granitos es 0.0002 emu.

Los mapas de susceptibilidad aparente constituyen una aproximación a la cartografía de la susceptibilidad magnética verdadera, mediante un parámetro contrastable con medidas de muestras sobre el terreno. Cuando las medidas de campo son coincidentes con los valores calculados de susceptibilidad, el correspondiente plano de isovalores puede interpretarse en términos de unidades geológicas. Normalmente tal hecho es infrecuente debido a que las hipótesis de cálculo, en esencia, que las fuentes magnéticas puedan ser modeladas por un conjunto de prismas verticales situados a la misma cota y sin remanencia, no se cumplen en la práctica.

En la mayoría de los casos el carácter de los mapas de susceptibilidad aparente es similar al de los de gradiente magnético vertical. Las diferencias en la apariencia de conjunto son debidas al uso de diferentes niveles de contorno y esquemas de color. Las fuentes magnéticas en ambos mapas suelen tener los mismos límites. Las áreas de poca actividad magnética y las de elevado relieve suelen coincidir, si bien los máximos de susceptibilidad aparente son más suaves que los correspondientes de gradiente vertical debido a la diferente forma en que operan

los filtros utilizados para el cálculo de uno y otro parámetro.

En nuestro caso particular la similitud entre los dos mapas es muy acusada por lo que los comentarios realizados respecto al gradiente magnético vertical son aplicables al plano de susceptibilidad magnética (fig. 11).

5.5. Deconvolución de Euler

Los resultados de la misma se expresan en la siguiente tabla, que refleja el porcentaje de soluciones para una profundidad aparente inferior a los 100 metros (fig. 12):

Indice estructural	N.º de soluciones	% inferior a 100 m
0	5.428	93 %
1	42.602	82 %
2	72.643	47 %
3	84.091	14 %

Como era de esperar, la mayor parte de las fuentes son interpretadas próximas a la superficie. Las profundidades aparentes aumentan con el índice (48 por 100 de las soluciones para $n = 3$ se sitúan entre los 100 y 200 m). En cambio, resulta sorprendente el aumento del número de soluciones con el aumento del índice. Dado que la geología general del área es probablemente mejor descrita por láminas extensas de buzamiento variable, las soluciones para el índice $n = 1$ deberían ser las más frecuentes. La chimenea vertical ($n=2$) y la esfera ($n=3$) no son a priori modelos realistas dentro del área de estudio. Por esto, el gran número de soluciones en estos dos casos puede explicarse como el resultado de la aplicación de un criterio de aceptación poco restrictivo.

En teoría, el índice $n = 1$ define:

- El eje de diques magnéticos verticales o subverticales.
- Los bordes de láminas horizontales.
- Contactos magnéticos.
- Una estimación de la profundidad de la fuente.

La utilización conjunta de las soluciones para $n = 1$ y el mapa de gradiente vertical permite

establecer, en términos teóricos, las siguientes relaciones:

- Las estructuras tipo diques quedarían definidas por una alineación de soluciones de Euler y contornos paralelos en los mapas de gradientes.
- A las láminas horizontales o cuerpos tabulares de gran espesor corresponderían alineaciones de soluciones de Euler coincidentes con la línea cero de gradiente.
- Las fallas se manifestarían mediante líneas de soluciones de Euler que no coinciden ni con la línea de contorno cero de gradiente ni con los máximos de éste.

Estas relaciones no son siempre aplicables puesto que las soluciones de Euler pueden ser erróneas si la fuente magnética no está aislada. Un paquete de celdas de 8×8 en la inversión de Euler puede englobar dos anomalías de gradiente vertical lo suficientemente próximas, y no proporcionar solución alguna.

5.6. Mapas de interpretación

De acuerdo con las ideas básicas descritas en los párrafos precedentes se han elaborado una serie de mapas de compilación/interpretación a escalas 1/500.000 (1 hoja), 1/200.000 (4 hojas) y 1/100.000 (10 hojas) para el área de los vuelos de la JEN. Todos los mapas incluyen las bases geográfica y geológica ya citadas (fig. 13).

Los rasgos básicos de interpretación contenidos en estos mapas son los siguientes: ejes magnéticos de baja intensidad, ejes magnéticos de elevada intensidad, cuerpos magnéticos horizontales, fallas, anomalías radiométricas, posible extensión de granitos bajo cobertera Cenozoica y límites de zonas magnéticas principales.

Los ejes magnéticos intensos quedan definidos por anomalías lineales de gradiente vertical con valores superiores a los 0.25 nT/m. Los ejes magnéticos de baja intensidad se asocian a anomalías lineales con amplitudes de pico entre 0.05 y 0.25 nT/m.

Los cuerpos horizontales o tabulares de gran espesor se han identificado de acuerdo con la información del plano de gradiente vertical y la deconvolución de Euler, de índice 1.

Figura 11.—Susceptibilidad magnética aparente. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.



Figura 13.—Síntesis de interpretación aeromagnética. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

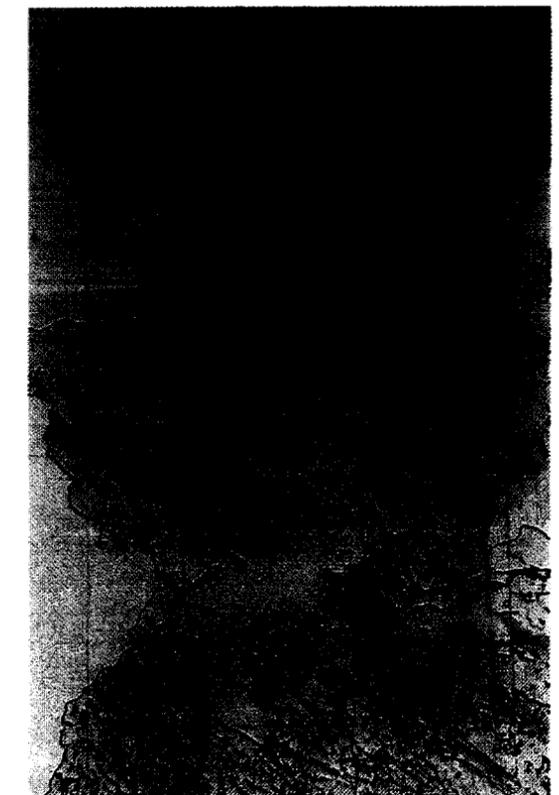
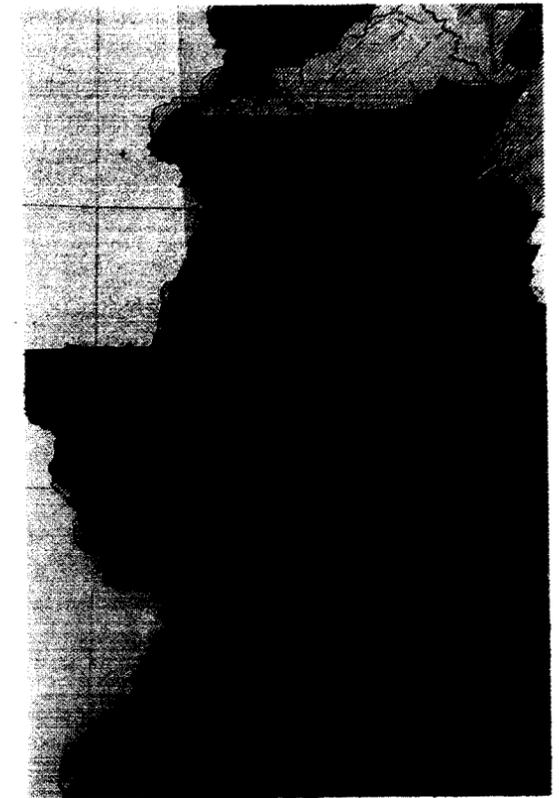


Figura 12.—Deconvolución de Euler. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

Figura 11.—Susceptibilidad magnética aparente. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

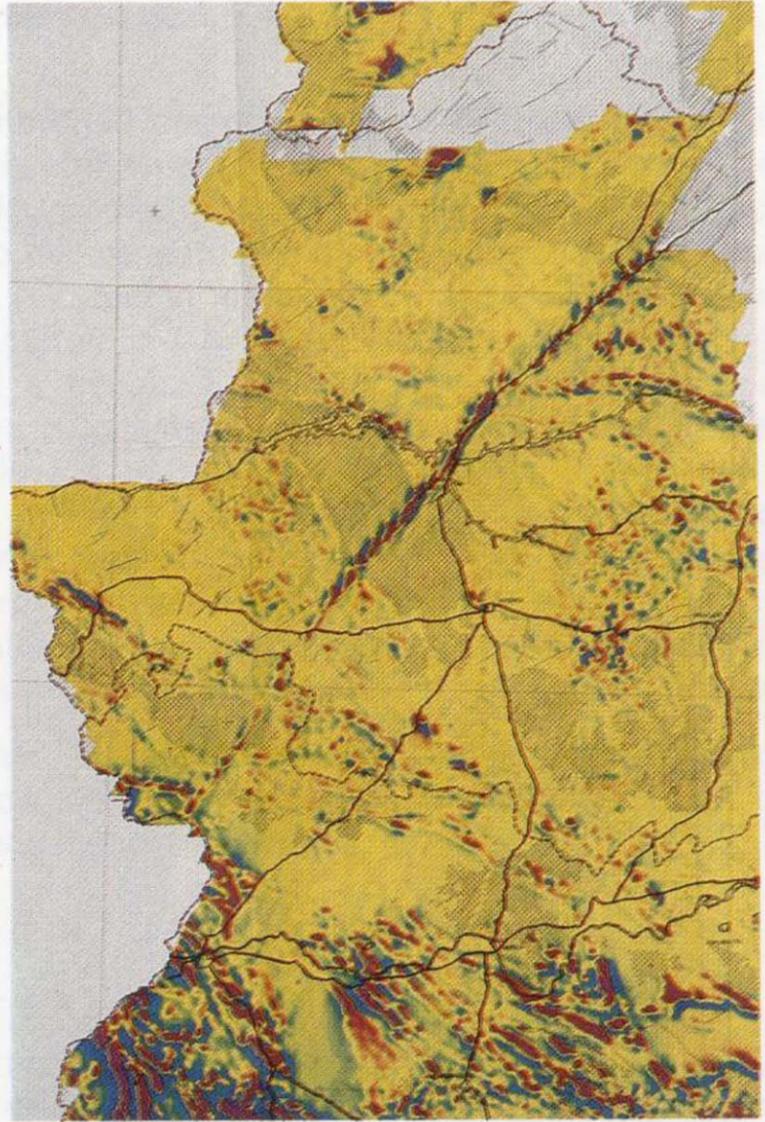


Figura 13.—Síntesis de interpretación aeromagnética. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

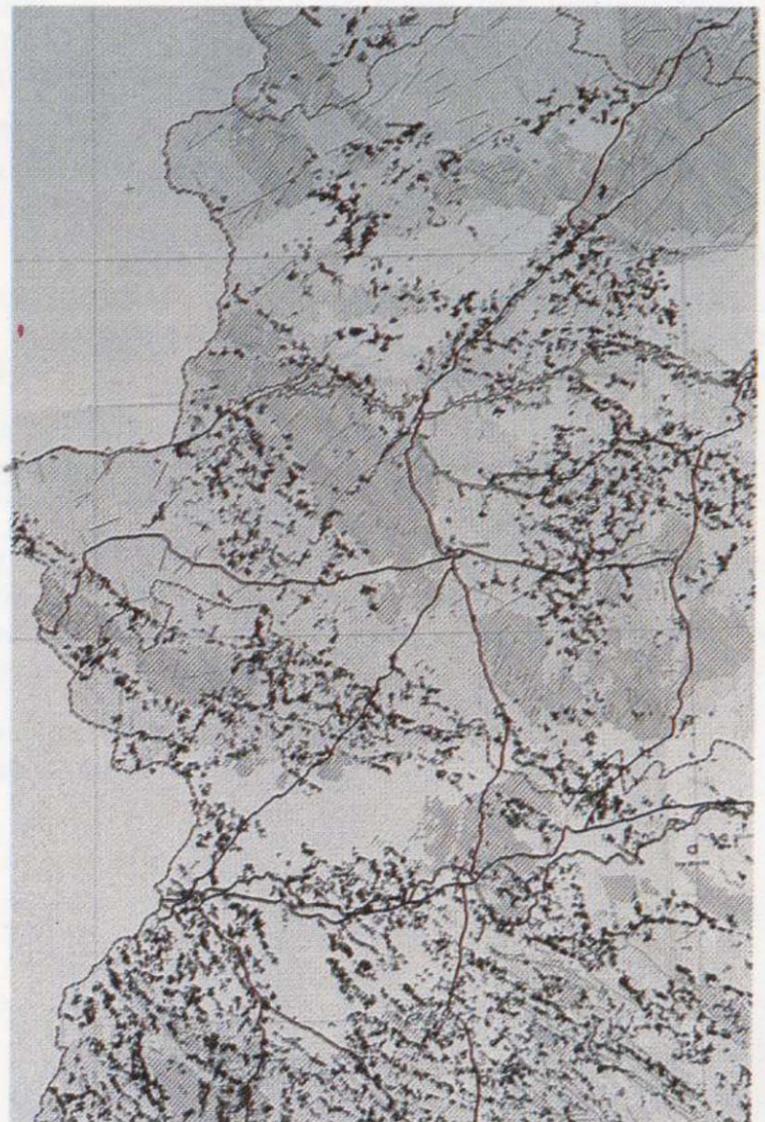


Figura 12.—Deconvolución de Euler. Penillanura Extremeña. Vuelos JEN.

La interpretación de las fallas se deriva de los mapas de deconvolución de Euler y de los de gradiente vertical, identificándose fallas regionales y estructuras que cortan ejes magnéticos alargados.

Las zonas de bajo relieve magnético bajo la cobertura Cenozoica se han interpretado como posibles granitos. En todo caso, sus límites se prolongan desde macizos graníticos conocidos. También se señala la existencia de zonaciones en los macizos graníticos, derivadas de la interpretación del mapa radiométrico ternario.

6. CONCLUSIONES

El reprocesado de varias campañas de geofísica aeroportada sobre el Macizo Hespérico, en concreto los vuelos de la JEN (80.000 Km de línea) y la parte de Galicia del vuelo del IGN (4.000 Km de línea) ha producido 268 mapas diferentes a escalas 1/500.000, 1/200.000, 1/100.000 y 1/50.000, y una base de datos con los perfiles corregidos y mallas para el tratamiento mediante generación de imágenes en tiempo real. Los parámetros representados han sido: campo magnético total, gradiente magnético vertical, susceptibilidad magnética aparente, deconvolución de Euler, mapa radiométrico ternario y compilación/interpretación.

Se dispone así por primera vez en el ITGE de cartografía magnética digital de cobertura nacional directamente explotable en ambientes gráficos integrales.

En cuanto a la interpretación de los resultados del proceso, sólo afecta a los 80.000 Km² volados con espaciado de 1 Km (JEN).

Este área cubre gran parte de las zonas Centro Ibérica y Ossa-Morena. El mapa que proporciona la imagen más realista de las variaciones de sus-

ceptibilidad magnética y por tanto el que aporta mayor información en términos geológicos, es el de gradiente magnético vertical. El reprocesado de los datos originales puede proporcionar una resolución de cuerpos magnéticos separados tan sólo 1 Km. Los mapas de gradiente vertical a escala 1/100.000 son sin duda los más útiles y lo máximo que se puede obtener a partir de los datos originales de los vuelos de la JEN. Estos documentos son susceptibles de una interpretación más detallada que la realizada en el proyecto, en particular, en exploración de minerales en zonas de Ossa-Morena. Las estructuras más fácilmente interpretables son las fallas.

Se han propuesto extensiones bajo sedimentos Cenozoicos de macizos graníticos conocidos en la zona Centro Ibérica.

REFERENCIAS

- BHATTACHARYYA, B. K. (1966): *Continuous Spectrum of the total magnetic field anomaly due to a rectangular prismatic body*. Geophysics, 31: 97-121.
- BROOME, J. H. (1987): *A modified Ternary Radioelement Mapping technique and its application to the South Coast of Newfoundland*. Geological Survey of Canada. Paper 87-14.
- BROOME, J. H. (1990): *Generation and interpretation of geophysical images with examples from the Rae Province, northwestern Canada Shield*. Geophysics, 55: 977-997.
- INSTITUTO GEOGRAFICO NACIONAL: *Mapa aeromagnético de España peninsular (Campo residual)*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 1987.
- REID, A. B.; ALLSOP, J. M.; GRANSER, H.; MILLET, A. J., y SOMERTON, I. W. (1990): *Magnetic interpretation in three dimensions using Euler deconvolution*. Geophysics, 55: 80-91.
- THOMPSON, D. T. (1982): *EULDPH: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data*. Geophysics, 47: 31-37.
- URQUART, W. E. S., y STRANGWAAY, D. W. (1985): *Interpretation of part of an aeromagnetic survey in the Magami area of Quebec*. The utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps, p. 426-438. S.E.G.

Original recibido: Diciembre de 1992.

Original aceptado: Enero de 1993.

Mineralogía de los óxidos de hierro de los suelos rojos de la cuenca del Ebro.

Por M. VIDAL BARDAN (*)

RESUMEN

En cuatro perfiles de suelo rojo de la cuenca del Ebro se estudia la mineralogía de los óxidos de hierro en las fracciones de arena y arcilla. La caracterización mineralógica se realizó por difracción de rayos X, A.T.D. e infrarrojos, tanto en agregados orientados de arcilla como en muestras en polvo de arcilla concentrada en óxidos de hierro. También se analiza la fracción pesada y ligera de la arena y limo grueso. Se confirma la existencia de una variada gama de especies minerales tales como hematites, göethita, lepidocrocita, maghemita y wüstita, así como un complejo silicoférrico del tipo de la hisingerita. Finalmente, se procede a la cuantificación de los diferentes óxidos por difracción diferencial de rayos X y al fraccionamiento de las diversas formas de hierro mediante diversos extractantes.

Palabras clave: Suelo rojo, Hematites, Göethita, Maghemita, Wüstita, Hisingerita.

ABSTRACT

In four profiles of red soil from the Ebro basin the mineralogy of the iron oxides in the sand and clay fraction is studied. The mineralogic characterization has been done by X-ray diffraction, A.T.D. and infrared, both in oriented clay aggregates as well as in powder of concentrated iron oxides. The heavy and light fraction of the sand and the thick silt have been also analyzed. The existence of a variety of mineral species as hematite, goethite, lepidocrocite, maghemite, wüstite, as well as a silicon-ferric complex from the hisingerite type, has been confirmed. Finally, the quantification of the different oxides by X-ray differential diffraction and the fractionate of the iron forms by different extractors is done.

Key words: Red soil, Hematite, Goethite, Maghemite, Lepidocrocite, Wüstite, Hisingerite.

INTRODUCCION

La mineralogía de los óxidos de hierro constituye un tema de gran interés dentro del estudio general de los suelos rojos. Sin embargo, son diversos los factores que dificultan el análisis de las formas de hierro; entre otros, su escaso contenido en el suelo, la pobreza cristalina, la presencia de impurezas y con frecuencia el solapamiento de sus espaciados de difracción de rayos X con los de otros minerales de la arcilla.

Los suelos rojos de la cuenca del Ebro componen un marco adecuado en donde abordar este estudio. En ellos se advierte una variada gama de formas cristalinas y paracristalinas de hierro, así

(*) E.T.S.I. Agrónomos de Lugo. C/ Aguas Férreas, s/n. 27002 Lugo.

como algunos restos de primitivas acumulaciones de hierro muy localizadas y con aspecto de núcleos acorazados.

Los perfiles de suelo que se presentan en este trabajo se han seleccionado como los más representativos de un estudio más amplio y detallado (VIDAL, 1991). Este trabajo pretende resaltar y sugerir una posible génesis para algunas de las singularidades mineralógicas que se describen en estos paleosuelos.

MATERIAL

Para lograr este objetivo se eligieron un total de cuatro perfiles de suelo rojo desarrollados sobre diversas formas de erosión que, en unos casos, se presentan como sistemas de terrazas de ca-

cácter fluvial y fluvio-glaciario y, en otros, aparecen sobre glaciares y otras formaciones de piedemonte. La distribución de estos depósitos cuaternarios es correlativa con el curso seguido por los ríos Aragón, Arga, Ega y Ebro. Los materiales que los componen son esencialmente de naturaleza sedimentaria, abundando, entre otros, los de tipo arenisca y calcáreos que afloran en diversos puntos de aquella región.

En la figura 1 se precisa la localización de los suelos estudiados. Los perfiles A1 y A2 representan el dominio de suelos rojos desarrollados sobre los glaciares y la terraza fluvio-glaciario del río Aragón respectivamente, en el curso comprendido entre Jaca (Huesca) y Yesa (Navarra). Las formaciones edáficas restantes se distribuyen

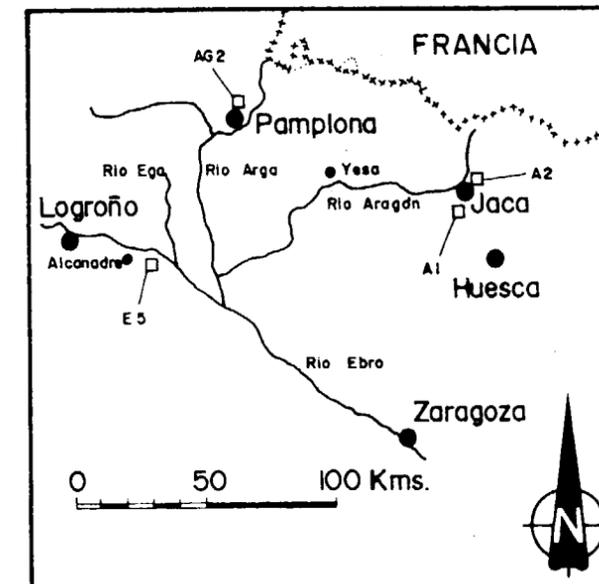


Figura 1.—Mapa regional y localización de los perfiles.

entre la cuenca de Pamplona, quedando representada por el perfil AG2, las formaciones del Ega y los extensos glaciares del sector riojano del Ebro, representados en este último caso por el perfil E5.

La información de carácter general y relativa a los suelos elegidos se resume en la tabla 1.

MÉTODOS

En primer lugar, se realizaron las determinaciones analíticas encaminadas a la caracterización general de los cuatro perfiles de suelo. Para ello, se llevaron a cabo las siguientes determinaciones: análisis textural (método internacional modificado por la pipeta de Robinson), pH en agua, materia orgánica y carbono (WALKLEY, 1934), nitrógeno (método de kjeldhal), carbonato cálcico (calcímetro de Bernard), capacidad de intercambio catiónico (método del acetato amónico), cationes de cambio (fotometría y complexometría), acidez valorable (método de Peech, 1947). Los óxidos de hierro y de aluminio libres fueron extraídos por el método del ditionito-citrato-bicarbonato (MHERA y JACKSON, 1960) y la determinación se efectuó por medio de absorción atómica.

La caracterización mineralógica de la fracción de arcilla se realizó mediante difracción de rayos X de agregados orientados y saturados previamente con magnesio y glicerina. También se obtuvieron los difractogramas correspondientes a las muestras de polvo procedentes de los concentrados de óxidos de hierro de la fracción anterior (NORRISH y TAYLOR, 1961). La estimación cuantitativa de los óxidos de hierro de la arcilla se ha realizado por difracción diferencial de ra-

TABLA 1
Información general de los perfiles de suelo

Perfil	Localización	Altitud (m)	Superficie	Altura relativa (m)	R. hídrico	R. térmico	Clasificación
A1	Jaca (Hu)	840	glaciares	93	údic	mésico	Fluventic Eutrocherept
A2	Jaca (Hu)	818	terracea fluvio-glaciario	52	údic	mésico	Typic Udorthent
AG2	Pamplona (Na)	470	terracea fluv.	43	xérico	mésico	Mollic Palixeralf
E5	Alcanadre (Rioja)	380	terracea fluv.	60	arídico	mésico	Ustollic Camborthid

yos X, con muestras concentradas en óxidos de hierro y desferrificados (MEHRA y JACKSON, 1960), siguiendo el procedimiento propuesto por SCHULZE (1979).

De igual modo, se ha examinado la fracción pesada y ligera de la arena y limo grueso de algunas muestras, realizando la separación con bromoformo. Con objeto de confirmar algunos de los resultados, se aplicaron otras técnicas de análisis y muy especialmente el A.T.D. y la espectrofotometría de infrarrojos.

Por último, se obtuvieron los valores de hierro total (Fet) mediante ataque con ácido sulfúrico y fluorhídrico sobre muestras de suelo menores de 2 mm y calcinadas a 450° C (PRATT, 1965), hierro libre (Fed) según el método de MEHRA (1960), y el hierro amorfo, de baja cristalinidad (Feo) extraído por la técnica propuesta por SCHWERTMANN (1973); el hierro de los extractos se determinó por absorción atómica.

Resultados y discusión

En las tablas 2 y 3 se presentan los resultados

analíticos generales de los cuatro perfiles de suelo objeto de estudio. Para lograr una estimación cualitativa y cuantitativa lo más precisa posible de las formas de hierro presentes en estos suelos, se procedió, en primer lugar, a obtener los concentrados de dichos óxidos en la fracción arcilla de aquellos horizontes del suelo que presentan máximos valores de hierro libre y hierro libre/arcilla. La tabla 4 muestra los cuatro horizontes elegidos de acuerdo con estos criterios, así como los valores de hierro total correspondientes a las muestras de arcilla natural y a los concentrados procedentes del tratamiento con OHNa 5N; también se ha calculado el efecto de concentración alcanzado en cada muestra.

Un buen ejemplo de estos paleosuelos lo constituye el perfil A2, según la notación empleada. Corresponde a la terraza fluvio-glaciaria de Jaca y se trata de un suelo rojo bien conservado gracias, en buena medida, al proceso de recubrimiento que experimentó esta terraza (VIDAL, 1990). El espesor de la contaminación superficial varía según su ubicación entre 50 y 120 cm y, como consecuencia, logró aislar y enterrar el primitivo suelo que se desarrolló inicialmente

TABLA 2
Datos analíticos

Perfil	Horizonte	Prof (cm)	2,0-0,2	0,2-0,02	0,05-0,002	0,02-0,002	<0,002	CO ₂ Ca(%)	pH	MO(%)	C/N
A1	Ap	0-30	11,3	57,3	15,6	9,7	18,6	—	6,9	2,8	13,4
	Bw1	30-50	12,2	58,1	14,0	11,3	17,1	—	6,4	2,7	12,3
	Bw2	50-75	11,1	54,2	14,9	13,8	17,7	—	7,3	1,5	12,0
	CB1	75-130	19,1	53,4	11,3	11,9	14,1	8,7	7,8	0,9	12,2
	CB2	130-150	17,4	54,8	10,1	10,2	14,5	12,8	7,9	1,1	8,7
A2	A	0-80	5,9	32,1	16,6	23,7	13,8	26,9	7,4	1,8	9,1
	Cc	80-120	7,2	31,3	12,2	27,8	15,4	17,0	7,7	1,1	7,4
	2Ab	120-160	8,9	41,7	11,3	21,6	14,9	13,5	7,7	0,5	3,5
	2Btb	160-200	6,9	38,7	14,0	21,9	23,2	9,3	7,4	0,2	1,8
	2CBb	200-210	7,8	35,6	12,4	17,7	25,3	10,7	7,7	0,2	2,2
	2Ck	210+	—	—	—	—	—	—	—	—	—
AG2	A	0-50	11,89	35,55	14,40	21,88	17,70	5,35	7,2	2,35	9,06
	2Bt	50-125	11,51	23,27	9,50	13,13	48,30	2,91	7,0	0,36	3,00
	2BC	125-155	25,21	27,78	10,50	13,07	33,55	2,16	7,5	0,47	3,85
	2Ck	155-300	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E5	Ap	0-30	18,40	26,62	6,77	13,12	29,75	3,50	7,90	2,65	9,05
	Bw	30-70	19,35	25,42	4,27	9,05	25,37	12,98	8,30	1,05	5,54
	BCk	70-120	16,60	24,37	4,67	5,82	24,37	22,80	8,30	0,60	4,37
	Ck	120+	—	—	—	—	—	—	—	—	—

TABLA 3
Datos analíticos (continuación)

Perfil	Horizonte	Prof (cm)	CIC	(meg/100 gr)					H+	V(%)	(libres)		Fe ₂ O ₃ /arcilla (%)
				Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺	K ⁺	Al ₂ O ₃ (%)			Fe ₂ O ₃ (%)		
A1	Ap	0-30	8,9	8,1	2,0	0,1	0,2	1,7	100	1,60	0,16	8,63	
	Bw1	20-50	7,8	6,1	2,0	0,1	0,2	2,2	100	1,60	0,17	9,37	
	Bw2	50-75	7,3	7,1	1,0	0,1	0,1	1,3	100	1,53	0,16	8,64	
	CB1	75-130	5,7	8,6	—	0,1	0,1	—	100	1,77	0,18	12,59	
	CB2	130-150	6,2	9,1	1,0	0,1	0,1	—	100	1,80	0,20	12,41	
A2	A	0-80	13,6	15,1	2,0	0,3	0,3	0,2	100	1,64	0,24	11,88	
	Cc	80-120	11,5	13,2	1,1	0,1	0,3	0,4	100	1,92	2,27	12,41	
	2Ab	120-160	10,5	12,1	2,0	0,1	0,3	0,6	100	2,52	0,37	16,94	
	2Btb	160-200	14,1	13,1	3,1	0,1	0,4	2,0	100	3,40	0,44	14,57	
	2CBb	200-210	14,6	18,1	2,1	0,2	0,3	—	100	3,30	0,43	7,08	
2Ck	210+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—		
AG2	A	0-50	12,22	17,17	3,03	0,12	0,66	0,95	100	2,85	0,47	16,1	
	2Bt	50-125	15,28	19,19	2,02	0,23	0,29	2,10	100	1,68	0,75	3,47	
	2BC	125-155	14,77	16,32	1,02	0,16	0,15	1,71	100	4,73	0,54	14,09	
	2Ck	155-300	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
E5	Ap	0,30	12,73	16,32	4,08	0,16	1,72	—	100	1,12	0,11	3,76	
	Bw	30-70	9,17	12,24	3,06	0,21	0,23	—	100	1,02	tr.	4,02	
	BCk	70-120	9,68	14,28	3,06	0,37	0,14	—	100	1,01	0,17	4,14	
	Ck	120+	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	

TABLA 4

Horizontes seleccionados en la concentración de los óxidos de hierro de la fracción arcilla, valores de hierro libre (Fed) y de hierro total (Fet) de muestras concentradas y naturales, expresado como Fe₂O₃.

Perfil	Horizonte	Fed. concentrados (%)	Fet concentrados (%)	Fet arcilla natural (%)	Eficacia tratamiento
A1	CB1	4,88	9,86	5,43	1,81
A2	2Btb	7,35	13,11	10,29	1,27
AG2	2BC	10,36	16,79	11,29	1,48
E5	Bw	6,48	8,72	3,21	2,71

en la base de aquella formación. Por otra parte, las diferencias mineralógicas apreciadas con relación al suelo original nos sugirió establecer también una discontinuidad litológica al considerar el cambio de material. En este y en los restantes perfiles se procedió al análisis mineralógico de las fracciones arena, limo y arcilla.

En general, las proporciones de fracción pesada de la arena oscilan entre el 1-4 por 100. En la

tabla 5 se presentan los resultados del análisis mineralógico de la arena (0,5-0,005) y del limo (0,05-0,02, 0,02-0,008 y 0,008-0,002) correspondientes al horizonte 2CBb del perfil A2 y 2BC del perfil AG2 de la terraza de Pamplona. El porcentaje de pesados se halló en los transparentes; es decir, los opacos naturales y los de alteración, y los fragmentos de roca son los correspondientes a cien minerales transparentes. Resulta evidente el predominio de los opacos de

TABLA 5
Mineralogía de arenas. Perfiles A2 y AG2

Horizonte... Perfil... Subfracciones...	AG2 2BC				A2 2CBb			
	0,5-0,05	0,05-0,02	0,02-0,008	0,008-0,002	0,5-0,05	0,05-0,02	0,02-0,008	0,008-0,002
Fracción ligera, d < 2'9								
% Cuarzo...	82	87	80	+++	87	89	68	++
% Feldespatos...	2	7	13	.	3	5	15	.
% Biotita...	1	1	—	++	1	1	—	+++
% Moscovita...	—	5	7	.	—	5	17	+++
% Calcedonia...	2	—	—	—	1	—	—	—
% CO ₃ ...	2	—	—	—	5	—	—	—
% Fragmtos. de roca	12	—	—	—	3	—	—	—
Espículas...	4	1	—	—	—	—	—	—
Fitolitos...	—	—	1	1	—	—	1	1
Pesados...	—	4	16	++	—	3	21	+++
Fracción pesada, d > 2,9								
Opacos naturales...	15	12	4	—	27	101	122	..
Oxidos de hierro...	53	160	616	+++	70	186	1326	+++
Hidróxidos de hierro.	190	29	128	+	68	44	126	+
Leucóxenos...	45	98	48	+	139	121	172	+
Frag. roca...	81	—	—	—	18	—	—	—
% Turmalina...	17	40	32	..	42	38	35	.
% Circón...	3	12	16	.	19	37	9	.
% Granate...	—	—	—	—	3	—	—	—
% Rutilo...	2	26	44	+	19	15	54	+
% Anatasa...	—	10	4	.	2	—	2	.
% Bronquita...	—	—	—	—	1	4	—	—
% Piroxenos...	28	6	—	—	—	—	—	—
% Anfíboles...	1	—	—	—	—	—	—	—
% Epidota...	43	3	2	—	2	—	—	—
% Zoisita...	6	3	2	—	—	—	—	—
% Apatito...	—	—	—	—	12	6	—	—

+++ dominante
++ abundante
+ frecuente
.. presencia
. escaso

alteración constituidos por granos de óxidos e hidróxidos de hierro y leucóxenos, con un escaso, aunque variado, cortejo de minerales transparentes.

En la fracción arena y mediante repetidos pasados de imán se pudo segregar la componente magnética del resto de la fracción pesada, comprobando de este modo que los horizontes superficiales del primitivo suelo rojo eran los más ricos en este tipo de material. La componente magnética de la arena la integran esencialmente dos tipos de elementos: en primer lugar, las con-

creciones ferruginosas con aspecto de aglomerados de cristales transparentes, ensamblados con un material cementante de color pardo rojizo; en segundo lugar, y en menor proporción, las plaquetas y microsferas de color oscuro y brillo submetálico. En la figura 2 se representa el difractograma de la muestra en polvo de la componente magnética de la arena de los horizontes A y Cc que componen el recubrimiento del perfil A2 de Jaca. Además de las reflexiones características de cuarzo y algo de feldespato contenidos en los aglomerados magnéticos, los

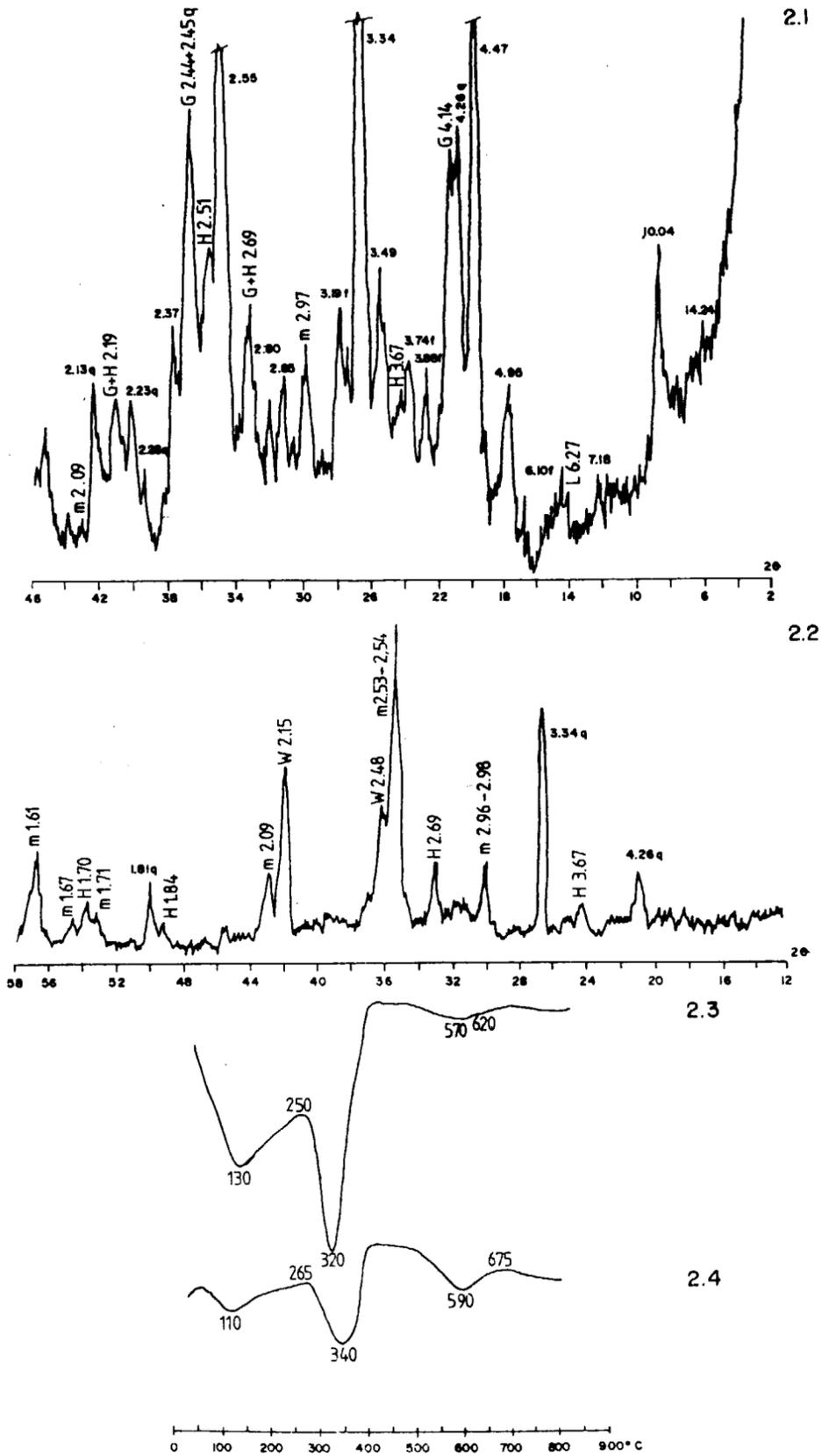


Figura 2.—2.1, rayos X de muestra en polvo de concentrados de óxidos de hierro de la arcilla del horizonte Ap del perfil A1; 2.2, rayos X de muestra en polvo de la componente magnética de la arena de los dos horizontes superficiales del perfil A2; 2.3 y 2.4, A.T.D. de la fracción pesada no magnética de la arena de los horizontes 2BC del perfil AG2 y Ap del perfil E5.

espaciados de 0,297, 0,253, 0,210, 0,171, 0,161 y 0,148 nm, junto con el arco comprendido entre 0,595 y 0,485 nm diagnostican a la maghemita como el material cementante de este tipo de agregados, además de la presencia de hematites. Como consecuencia, las intensas reflexiones de 0,248, 0,215 y 0,152 nm son debidos a los granos restantes de esta fracción; entre éstos existen algunos de color ceniza oscuro, y que únicamente se descubrieron en aquellos dos horizontes que componen el recubrimiento del perfil A2. Estas reflexiones son diagnósticas de la wüstita u óxido ferroso cristalizado y no tienen posible confusión con las correspondientes a otros óxidos e hidróxidos de hierro. Solamente se pudo identificar en la fracción fina y media de la arena del perfil A2 de la terraza de Jaca, presentando una textura de granos subredondeados y de color gris. Su origen parece estar asociado con el barrido de suelos y con las formaciones morrénicas de los antiguos glaciares que ocuparon la cabecera del río Aragón, aguas arriba de la localidad de Jaca.

De igual modo, en el tamaño limo grueso (0,05-0,02 nm) se procedió a la separación de la fracción magnética con ayuda, en este caso, de un electroimán. En esta fracción se descubren las formas criptocristalinas de óxidos de hierro que

en unos casos presentan textura columnar y en otros aparecen como microcristales de hábito redondeado y que, a su vez, parecen descomponerse en unidades octaédricas de menor tamaño. El análisis de rayos X de muestras en polvo de esta fracción es muy semejante en los cuatro perfiles que se han estudiado. Los difractogramas muestran una composición a base de cuarzo y hematites en combinación con el óxido ferromagnético o maghenita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). El contorno menos definido de la reflexión de 0,257 nm y la vaguedad que presenta la de 0,299 - 0,302 nm denotan una estructura de maghemita menos cristalina que la contenida en la fracción arena. Los tratamientos térmicos a 700° C durante seis horas a los que se sometió posteriormente esta fracción, demuestran en todos los casos un debilitamiento muy fuerte de la reflexión de 0,29 nm y un cambio importante en la de 0,25 nm junto con la intensificación de la de 0,27 nm, como consecuencia de la transformación del mineral ferromagnético en hematites, como fase estable. La tabla 6 resume el análisis mineralógico obtenido por difracción de rayos X de agregados de muestras naturales de arcilla preparados a partir de suspensiones de arcilla dispersa y saturada en magnesio y glicerina. Es posible identificar una asociación mineralógica compuesta princi-

TABLA 6.
Mineralogía de arcillas

Perfil	Horizonte	Mica-ilita	Caolinita	Clorita	Ilita-clorita	Vermiculita
A1	Ap	XX	X	X	tr.	—
	Bw1	XX	X	tr.	tr.	—
	Bw2	XX	X	X	tr.	—
	CB1	XX	X	tr.	—	—
	CB2	XX	X	tr.	—	—
A2	A	X	—	tr.	—	—
	Cc	X	—	tr.	tr.	—
	2Ab	X	—	tr.	tr.	—
	2Btb	X	—	tr.	—	tr.
	2CBb	XXX	—	tr.	—	tr.
AG2	A	XXX	tr.	—	—	—
	2Bt	XXX	XX	—	—	X
	2BC	XXX	XX	—	—	XX
E5	Ap	XXX	XX	X	tr.	—
	Bw	XX	XX	X	tr.	—
	Bck	XX	XX	XX	tr.	—

palmente por mica-ilita, caolinita, clorita, vermiculita y trazas de un interestratificado de ilita-clorita. Con objeto de lograr una mejor caracterización de las formas de hierro presentes en la fracción fina, se obtuvieron los difractogramas de rayos X de las muestras en polvo procedentes de los residuos de concentrados de óxidos de hierro mediante tratamiento con rosa y posterior lavado con carbonato amónico. La figura 2.1 recoge el análisis de rayos X correspondiente al horizonte Ap del perfil A1. En él se advierte un cortejo de minerales micáceos compuestos por mica-ilita, caolinita, clorita e ilita-clorita; abundante goëthita, hematites y maghemita, con trazas de lepidocrocita. La maghemita se identifica en la lámina delgada de suelo por la presencia de formas globulares y octaédricas de color rojo, de pocas micras de diámetro y dispersos en la micromasa roja del suelo. Estos microlitos surgen asociados o pueden encontrarse en diversos estados de disgregación.

Tanto en los difractogramas de agregados orientados de muestras naturales de arcilla como en las muestras en polvo de los residuos de concentrados en óxidos de hierro se advierten tres reflexiones muy intensas de 0,45, 0,25 y 0,15 nm, aproximadamente. En los agregados calcinados estos espaciados aparecen reforzados en relación con los obtenidos a temperatura ambiente. Por otra parte, los tratamientos desferrificantes debilitan o incluso llegan a suprimir estas reflexiones. La interpretación de este comportamiento es compleja, en el sentido de que pueden ser varias las causas que lo originan. A su vez, estos tres espaciados corresponden a reflexiones (h, k, o) de minerales de la arcilla de retículo laminar. Para una correcta explicación de este hecho, hay que tener en cuenta la componente de hierro no cristalino de estos suelos que actúa como agente cementante y dificulta una adecuada orientación de los agregados tratados con glicerina y, como consecuencia atenúa la expresión de sus reflexiones basales. Asimismo, en las muestras de polvo, en donde la orientación de los minerales de la arcilla resulta al azar, el efecto de esta componente amorfa se ve incrementado y se traduce en un reforzamiento de las reflexiones no basales (h, k, o) de algunos minerales de la arcilla, como en el caso de la mica-ilita. Estos hechos invocan la presencia de un filossilicato de naturaleza compleja y estrechamente asociado a la fracción de arcilla, como el

responsable, en parte, de las bandas de difracción de 0,450, 0,257 y 0,153 nm. Este conjunto de reflexiones revelan la presencia de un filossilicato de hierro hidratado del tipo de la hisingerita. Por tanto, a la intensa reflexión de 0,225 nm, que aparece en la muestra de arcilla concentrada del perfil A1 (fig. 2), contribuyen, por una parte, el efecto de desorientación de la muestra en polvo (acentuando los espaciados hk en relación con los basales ool) y, por otra, la presencia del complejo silicoférrico de fórmula general $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (HERBILLON, 1986).

En estos suelos hay que tener en cuenta además la existencia de maghemita que origina una banda de difracción de primer orden de 0,255 - 0,257 nm que se solapa con la anteriormente mencionada.

En la figura 3 se representan los esquemas de perfil de los cuatro suelos analizados, en los que se refleja mediante las intensidades relativas de las reflexiones diagnósticas de los óxidos de hierro las proporciones de cada una de las formas de hierro existentes. Dado el solapamiento de reflexiones entre la hisingerita y la maghemita, se denota con M la suma de las dos especies minerales. Esta simple estimación induce a pensar que mientras la goëthita y la hematites se mantienen aproximadamente constantes a lo largo del perfil, la lepidocrocita tiende a aumentar hacia la base de la formación, al contrario de lo que ocurre con el óxido ferromagnético que, a pesar de la coincidencia de reflexiones a la que se ha aludido anteriormente, parece ser más abundante en los horizontes superficiales.

A continuación, en los cuatro horizontes tipo en los que se obtuvieron la arcilla concentrada, se procedió a cuantificar los óxidos de hierro mediante difracción diferencial de rayos X. Para ello, se utilizaron los difractogramas de arcilla concentrada en óxidos de hierro y los correspondientes a las muestras desferrificadas con detionito-citrato-bicarbonato. La comparación de ambos patrones y los valores de hierro libre, expresados como Fe DCB-Fe oxalato, permiten obtener los resultados que se muestran en la tabla 7. Al objeto de lograr una confirmación de los resultados obtenidos, se emplearon además el análisis térmico diferencial y la espectrofotometría de infrarrojos. En las figuras 2 y 4 se exhiben los diagramas obtenidos en el A.T.D. de las fracciones pesadas no magnéticas del

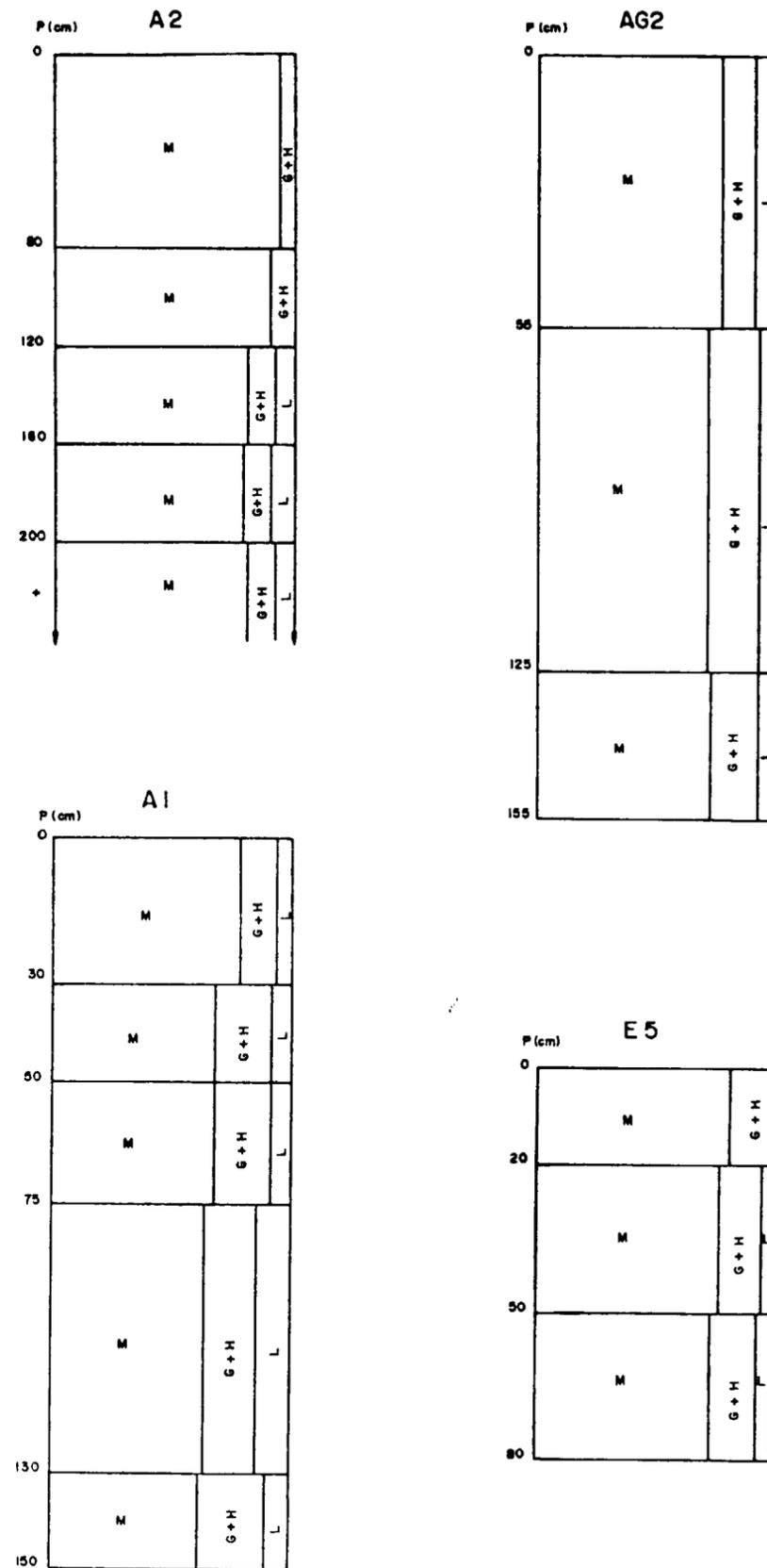


Figura 3.—Proporciones de los óxidos de hierro de cada perfil. G, gôethita; H, hematites; L, lepidocrocita; M, maghemita + hisingerita.

TABLA 7
Proporciones de gôethita (G), hematites (H) y lepidocrocita (L) en las muestras de arcilla concentrada en óxidos de hierro de los cuatro horizontes tipo

Perfil	Horizonte	G(%)	H(%)	L(%)	G+H(%)	Total (%)
A1	CB1	2,73	1,08	0,85	3,81	4,66
A2	2Btb	2,82	0,58	2,58	3,40	5,98
AG2	2BC	6,16	2,28	0,81	8,44	9,25
E5	Bw	2,58	2,50	0,45	5,08	5,3

XXX : Dominante.
 XX : Abundante.
 X : Escaso.
 tr. : Trazas.

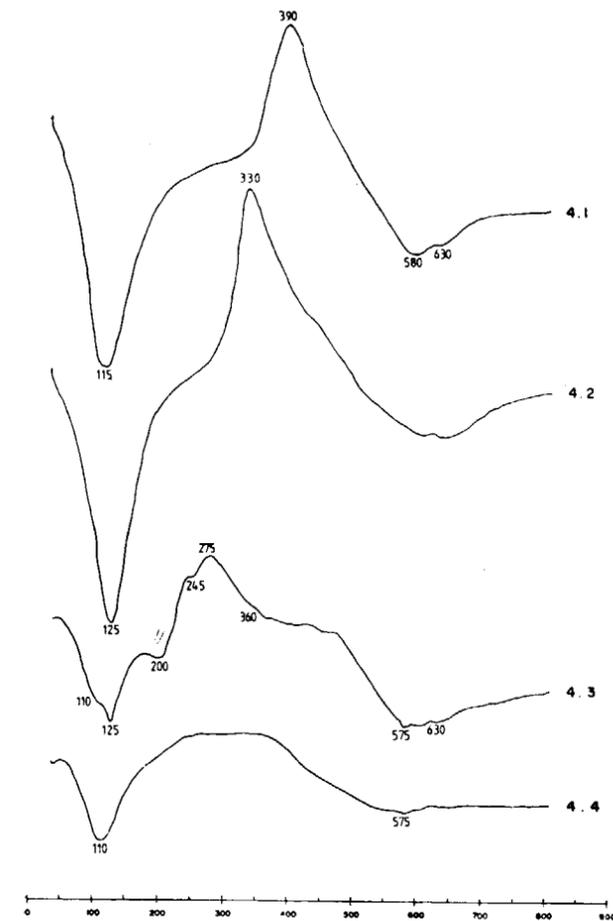


Figura 4.—A.T.D. del horizonte 2Btb del perfil A2. 4.1, arcilla concentrada en óxidos de hierro; 4.2, arcilla desferrificada con ditionito-citrato-bicarbonato; 4.3, arcilla desferrificada con oxalato amónico; 4.4, arcilla desferrificada con CIH 1/1.

perfil AG2 de Pamplona y del E5 de Alcanadre, así como los correspondientes a las muestras de arcilla concentrada y desferrificada con ditionito-citrato-bicarbonato, oxalato amónico y CIH 1/1 del horizonte 2Btb del perfil A2. En los termogramas de la figura 2, que corresponde a la fracción pesada de la arena rica en óxidos e hidróxidos de hierro y leucoxenos, se observan endotérmicos amplios y de baja intensidad debidos a la pérdida de agua absorbida, pero los efectos más destacados suceden entre 320 y 340 °C y obedecen a la descomposición de la gôethita, con un hombro característico por encima de la línea de base. En las pruebas números 1 y 2 de la figura 4 y correspondientes a arcilla concentrada en óxidos de hierro, se aplicó un importante caudal de nitrógeno, realizándose las pruebas restantes con atmósfera de aire con objeto de resaltar la eficacia de los diferentes extractantes. En estos cuatro últimos ensayos se observa que los efectos térmicos registrados entre 110-125 °C son debidos a la pérdida de agua absorbida y a los procesos de deshidroxilación de minerales de tipo 2/1 de la arcilla y, también, parece lógico asociar el intenso exotérmico de la región de 275-390 °C con la transformación de la especie ferromagnética de hematites. No cabe la posibilidad de que este último efecto obedezca a la combustión de la materia orgánica dado que se reproduce en las pruebas realizadas con atmósfera de nitrógeno. De igual modo, tampoco se puede atribuir a la oxidación de granos de magnetita que contienen algunas areniscas ya que los dos exotérmicos que origina su oxidación se suprimen al realizar

la prueba con atmósfera de nitrógeno (VIDAL, 1989). Finalmente, los pequeños endotérmicos que surgen a la temperatura de 575-630 °C representan el cuarzo y el punto de Curie de la hematites, siendo reversible este último efecto sobre la curva de enfriamiento.

Los espectros de infrarrojos no hacen más que confirmar la composición mineralógica deducida mediante las técnicas analíticas anteriores. Las muestras seleccionadas fueron las mismas que las empleadas en la obtención de los concentrados de óxidos de hierro. Se confirma la existencia del silicato de hierro hidratado (hesingerita), con un registro de bandas de absorción característico y difícil confusión con otros componentes de la arcilla. La banda de frecuencia variable entre 3440-3420 cm^{-1} podría interpretarse, en un primer momento, como debidas a grupos OH de agua molecular absorbida, reducida a un hombre en el caso de la muestra del perfil E5, pero teniendo en cuenta que todas las muestras fueron desecadas previamente y durante un largo período de tiempo, hacen pensar más bien que se trata de una banda debida a un componente natural e hidratado, de naturaleza silicatada y del tipo de la hisingerita. Aquella banda está asociada a otra más ancha que presenta en al-

guna de las muestras un doblete en su interior y que queda registrada en una posición también variable entre 1680-1630 cm^{-1} . Todo ello sugiere que se trata de una especie mineral de composición aleatoria y con apreciable desorden estructural.

Por último, en la tabla 8 se presenta el fraccionamiento de las formas de hierro que se ha realizado por medio de diversos extractantes. En general, no resulta sencilla la interpretación de los valores obtenidos. A esta complejidad contribuyen principalmente dos factores: la hidromorfia y los procesos de erosión y reordenamiento edáfico que han experimentado estos suelos (VIDAL, 1992). Los fenómenos de hidromorfia pueden originar redistribuciones secundarias de hierro que hacen difícil el análisis de los valores de hierro libre (Fed/Fet) a lo largo del perfil. Por otra parte, aquellos suelos que se han visto sometidos a procesos de desmantelamiento y de arrastre anteriores pueden presentar actualmente cualquier combinación u ordenamiento de valores, que no reflejan, por tanto, la disposición original de sus horizontes. A pesar de estos inconvenientes, se observa en los cuatro perfiles un progresivo incremento del hierro libre con la profundidad, aunque en algu-

TABLA 8
Fraccionamiento de las formas de hierro
Valores expresados en Fe_2O_3

Perfil	Horizonte	Fet (%)	Fed (%)	Feo (%)	Fed/Fet (%)	Feo/Fed (%)	Fed-Feo/Fet (%)
A1	Ap	3,25	1,60	0,37	49,2	23,1	37,8
	Bw1	3,20	1,60	0,34	50,0	21,2	39,3
	Bw2	3,34	1,53	0,35	45,8	22,8	35,3
	CB1	3,11	1,77	0,28	56,9	15,8	47,9
	CB2	3,25	1,80	0,33	55,4	18,3	45,2
A2	A	3,71	1,64	0,57	44,2	34,7	28,2
	Cc	4,21	1,92	0,58	45,6	30,2	31,8
	2Ab	5,36	2,52	0,67	47,0	26,5	34,5
	2Btb	4,29	3,40	0,39	79,2	11,4	70,1
	2CBb	4,04	3,30	0,54	81,7	16,3	68,3
AG2	A	5,27	2,85	0,74	54,0	25,9	40,0
	2Bt	7,36	1,68	0,61	22,8	36,3	14,5
	2BC	4,26	4,73	0,36	100	7,6	100
E5	Ap	4,11	1,12	0,16	27,2	14,2	23,3
	Bw	3,24	1,02	0,08	31,4	7,8	29,0
	BCK	3,48	1,01	0,08	29,0	7,8	26,7

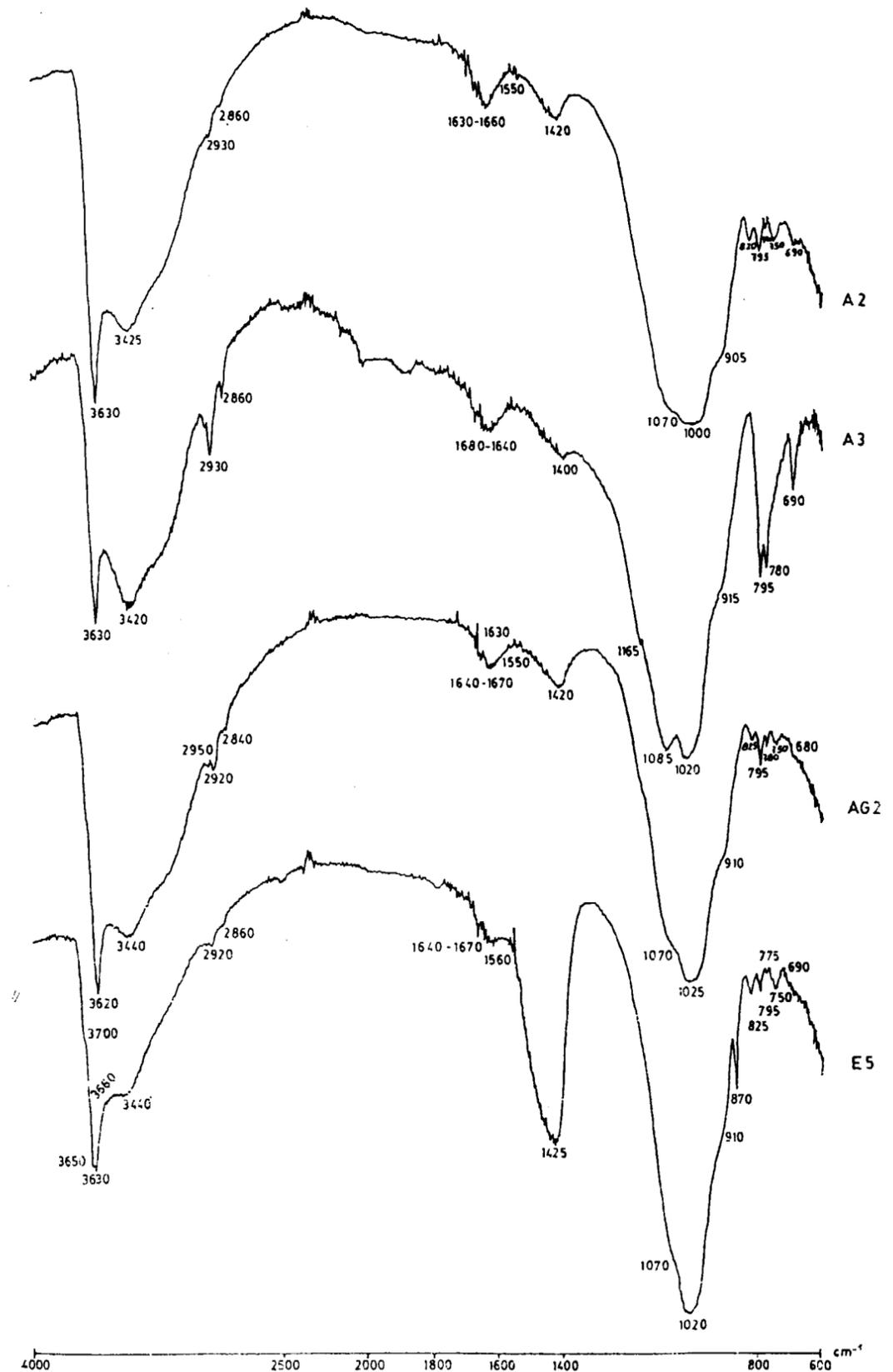


Figura 5.—Espectrofotometría de infrarrojos.

nos casos se encuentren intermitencias. Por el contrario, y como parece lógico, los valores Feo/Fed (hierro amorfo o de baja cristalinidad) presentan su valor máximo en el horizonte más superficial de cada perfil. Como la maghemita resulta más soluble en oxalato amónico que con ditionito-citrato-bicarbonato, aquel comportamiento parece estar relacionado con la variación de las proporciones de maghemita estimada mediante rayos X, en donde se apreciaba un progresivo empobrecimiento del óxido ferromagnético con la profundidad.

CONCLUSIONES

Se establece mediante difracción de rayos X, A.T.D. e infrarrojos la existencia de una gama de minerales de hierro compuesta por gœthita, hematites, lepidocrocita, maghemita y wüstita, aunque, en la mayoría de los casos, todas estas formas no concurren en un mismo perfil.

La maghemita de estos suelos presenta un doble origen: por una parte, la alteración de algunas areniscas es la responsable de la progresiva oxidación de la magnetita detrítica presente en aquellos materiales y, por otra, las concreciones magnéticas son el resultado de repetidos ciclos de oxidación-reducción de complejos hidroxilados de Fe(II) - Fe(III) en la zona superficial del perfil, en donde el buen desarrollo estructural y el contenido relativamente bajo de arcilla favorece las condiciones de microaireación del suelo.

Los granos de wüstita presentes en la fracción arena del recubrimiento de la terraza fluvio-glacial de Jaca parecen provenir del barrido de los suelos y de las formaciones morrénicas de los antiguos glaciares que ocuparon la cabecera del río Aragón.

Se atribuye a un complejo silicoférrico del tipo de la hisingerita, además de a la mica-moscovita, la presencia de los intensos espaciados de 0,45, 0,25 y 0,15 nm, aproximadamente. Se trata de una especie mineral secundaria y de origen edáfico a partir de la formación de una especie de gel procedente de la alteración de minerales de

hierro y bajo condiciones de fluctuación del nivel freático, prosiguiendo mediante etapas de nucleación de dicho gel.

El análisis de rayos X demuestra que el ditionito-citrato-bicarbonato solubiliza preferentemente los óxidos e hidróxidos de hierro del tipo gœthita y hematites, mientras que el A.T.D. resalta la extracción de maghemita por medio del oxalato amónico.

REFERENCIAS

HERBILLON, A. J. (1986): *Contribution of experimental studies to the knowledge of short-range ordered minerals in soils*. Sci. du Sol, 1: 133-134.

MEHRA, O. P., y JACKSON, M. L. (1960): *Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with sodium bicarbonate*. Clay and clay Miner., 7: 317-327.

NORRISH, K., y TAYLOR, R. M. (1961): *The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites*. J. Soil Sci., 12: 294-306.

PEECH, M. (1947): *Methods of soils analysis for soil fertility investigations*. U. S. Dept. Agr. c. 757, 25 pp.

PRATT, P. F. (1965): *Digestion with hydrofluoric and perchloric acids for total potassium and sodium*. In: C. A. Black et al. (Editors). *Methods of soil Analysis, I. Agronomy series Nr. 9*. Am. Soc. Agrom., Modison, Wisc., 1019-1021.

SCHULZE, D. G. (1979): *Differential X-ray diffraction (DXRD) of soil iron oxides*. Agrom. Abstr., 71st Ann. Mtg., Am. Soc. Agrom., Fort Collins, Colo.

SCHWERTMANN, U. (1973): *Use of oxalate for Fe extraction from soils*. Can. J. Soil sci., 53: 244-246.

VIDAL, M. (1989): *Aspectos geoquímicos y mineralógicos de la alteración de algunos minerales fluvio-glaciares de los ríos Gállego y Aragón*. Bol. Geol. Min. de España, 100-6: 1112-1117.

VIDAL, M. (1991): *Los suelos rojos de la cuenca del Ebro: génesis y clasificación*. Serie de investigación científica, microfichas. Instituto de Estudios Altoaragoneses. Diputación de Huesca.

VIDAL, M. (1992): *Los suelos rojos de la Canal de Berdún*. Suelo y planta (en prensa).

WALKLEY, A. (1934): *An examination of the Dejtjareff-method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method*. Soil Sci., 37: 29-38.

Original recibido: Diciembre de 1992.
Original aceptado: Enero de 1993.

INFORMACION

El método científico y la Geotecnia

Por J. A. JIMENEZ SALAS (*)

Puesto que no hay más amargo dolor que el recuerdo del bien perdido, el Ministerio de Obras Públicas tenía, en 1957, razones para entristecerse, porque la Escuela de Caminos, su Escuela, había pasado al Ministerio de Educación.

Perdía así el Ministerio lo que había constituido la clave de su estructura técnica, lo que parecía garantizar su excelencia. Y quedaba una llaga sangrante en aquel lugar en donde la Escuela había estado adherida.

Sin embargo, los tejidos de esta llaga demostraron tener una gran capacidad de regeneración, y esto fue porque, después de muchas dudas y alguna transacción, se había acordado que los Laboratorios principales de la Escuela, aquellos que se habían levantado por encima del nivel meramente didáctico, quedasen en el M.O.P. Estos núcleos, en lugar de decaer al ser separados de su matriz, tuvieron una vitalidad más que suficiente para cicatrizar la herida, e, integrados en el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, se desarrollaron con ritmo sostenido y, en alguno de ellos, espectacular.

No es posible abordar el análisis del papel del Laboratorio del Transporte y Mecánica del Suelo, durante el largo lapso en el que ha estado constituido de esta forma, sin apoyarnos en alguna base conceptual sobre las interacciones entre la Ciencia y la Técnica. Y, sobre esta cuestión, no puedo por menos de introducir aquí, resumidos, algunos párrafos de una conferencia que pronuncié en Oaxaca, en 1982, dentro de las celebraciones del 25 Aniversario de la Sociedad Mexicana de Mecánica del Suelo. La conferencia tuvo como título *El lugar de la Geotecnia en el Panorama de la Ciencia* y, dado que tuvo poca difusión impresa en México, y prácticamente nula en España, no me parece inoportuno el extractarla en esta ocasión.

(*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; Académico de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

Hay un hecho verdaderamente singular en la historia de la Mecánica del Suelo, y este es el que tenga una partida de nacimiento. Para una gran mayoría, su fundador claro e indiscutible es Terzaghi, y la fecha del nacimiento es 1925, el año en el que se publica la *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*.

No altera esta singularidad el que en los países del Este europeo (y podemos decir que, casi exclusivamente en Rusia) se dé otro nombre y otra fecha algo anterior, ya que, en todo caso, se establece una fecha y un padre, lo que no es frecuente en una rama de la Ciencia, y menos en una de la Técnica, que viene a irse formando por la acumulación de elementos empíricos y científicos, que poco a poco van siendo organizados por la acción metabólica de los segundos.

LOS MOVIMIENTOS PREMONITORIOS

Y, sin embargo, bien pudiera objetarse en contra de esa datación el que, en los textos que estudiamos, vemos constantemente citados nombres muy anteriores a esas fechas, tales como Coulomb, Rankine, Reynolds, Boussinesq, Massau, Prandtl y otros muchos.

Pero observemos que, si bien sus aportaciones fueron importantes para el nacimiento de la Mecánica del Suelo, no representaron para ellos mismos más que episodios de su carrera científica que, en algunos casos, ni siquiera tenían intención de referir al suelo. BOUSSINESQ (1885) y, sobre todo, PRANDTL (1923) resolvieron sus ecuaciones sin prestar excesiva atención a que los modelos elegidos tuvieran una correspondencia real con el suelo. Y esto es mucho más cierto en el caso de REYNOLDS (1885), el cual estableció una de las propiedades fundamentales de los suelos, la dilatancia, mediante una cuidadosa experimentación con arena. Pero lo curioso es que no buscaba determinar el comportamiento de ésta, sino que solamente la tomaba como un modelo físico para explicar la razón de las antitéticas propiedades del éter, rígido frente a las

solicitaciones instantáneas y blando ante las lentas. Precisamente el tipo de reacciones de la arena densa saturada.

No pudo por menos Reynolds de darse cuenta de las posibles implicaciones geotécnicas de sus descubrimientos y, así, dice, de pasada, que *podrían colocar las teorías de empuje de tierras sobre bases verdaderas*; pero ni él, ni ninguno de los otros autores citados, alumbró la Mecánica del Suelo, aunque proporcionaran materiales muy valiosos para construirla. Sus incursiones en estos dominios, lo que demuestran, es que la Geotecnia era en aquel entonces un terreno vago, científicamente vacío, por el cual cruzaban, casi indiferentes, estos ilustres transeúntes, en su camino hacia sus verdaderas ocupaciones.

No deja de producir perplejidad el hecho de que no se sintieran atraídos por unos temas que, en una época posterior, iban a concentrar la atención de tantos investigadores. Las causas pueden ser varias y corresponden a diversas hipótesis entre las que se han formulado sobre el desarrollo de la Ciencia. La realidad corresponderá probablemente a una combinación de las mismas.

LOS PRECEDENTES INMEDIATOS

Podemos localizar también otro momento crítico para la Ingeniería Civil, en los problemas del terreno. Esto ocurre en 1913. En esa época, en Suecia, Estados Unidos, Panamá y Alemania, habían ocurrido accidentes catastróficos en obras que implicaban movimientos de tierra de gran importancia, los cuales habían llegado a ser posibles gracias al progreso de los medios mecánicos de excavación.

En Suecia, se forma una Comisión para estudiar los corrimientos de los nuevos muelles del puerto de Gotemburgo, y otra diferente para investigar los que se habían producido en los ferrocarriles. Para estudiar los deslizamientos en las riberas del canal de Kiel, se moviliza la atención del Laboratorio de trabajos hidráulicos de Berlín, dirigido por Krey. En los Estados Unidos, los catastróficos corrimientos del Canal de Panamá, demuestran la insuficiencia de los conocimientos disponibles, y la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles, ese mismo año de 1913, forma un Comité presidido por Cummings, para analizar la situación.

Todos estos frentes de ataque consiguen resultados que, en buena parte, seguimos utilizando hoy: la Comisión Fellenius (Gotemburgo) formula el método sueco de estabilidad de taludes que, aunque perfeccionado, todavía empleamos. Krey desarrolla y afina la teoría de empuje de tierras. Todo ello aumentó la cantidad, la calidad y la temperatura del ambiente geotécnico, pero sin sobrepasar un nivel, en el fondo, empírico. Incluso, si las cosas se hubieran desarrollado de otra forma, estos avances parciales hubieran podido ser retardadores del nacimiento de la Mecánica del Suelo, ya que daban reglas, recetas de aspecto de gran precisión para resolver aquellos problemas que habían sacudido la conciencia de los profesionales, e incluso habían llegado al conocimiento del pú-

blico general. Aquí, como tantas veces ha sucedido, el éxito pragmático hubiera podido ser una barrera para el progreso del conocimiento racional del hecho.

Y de todos los trabajos que durante ese período de gran dedicación al tema se efectuaron, quizá los que llegaron a conclusiones más acertadas y fecundas fueron los de la Comisión americana. Describieron con gran detalle los fenómenos, pero llegaron a pocos resultados «prácticos». A cambio de esto, efectuaron la lúcida recomendación de que era muy necesario llegar a identificar magnitudes medibles en los suelos, sin lo cual no se podría, en absoluto, trasladar la experiencia obtenida en un caso a otro cualquiera.

LOS AÑOS FUNDACIONALES DE LA MECANICA DEL SUELO

Pero, para ello, hubo que esperar al año 1917, en el declive de la primera Guerra Mundial, cuando Terzaghi es reclutado por el Ministerio de Asuntos Exteriores de su país, como profesor de la Escuela Técnica de Constantinopla, capital de un país hermano de armas, a cuyo desarrollo tecnológico Austria se ha comprometido a colaborar. Ni el momento ni el ambiente tienen nada de propicio a la investigación. En cuanto a los medios, han quedado relatos de cómo en un patio, Terzaghi montó sus aparatos compuestos con elementos, algunos procedentes del Laboratorio de Física, pero la mayor parte procedentes de la cocina de la institución; lo cual debe servir para hacer reflexionar a tanto investigador, que no hace nada porque no le proporcionan el último modelo de un aparato que vio descrito en una revista. Para esta clase de investigadores se formuló el dictado: *Quien compra un aparato, quizá hiciese mejor en comprar los resultados*. Terzaghi, en cambio, consigue ir acumulando datos con sus rudimentarios dispositivos, y estableciendo para su interpretación algunas teorías que publica, primero, fragmentariamente, y que luego articula y sistematiza en el libro fundacional, en su *Erdbaumechanik*.

VALOR DE LA INVESTIGACION HEURISTICA

Habíamos visto antes, en la actividad de las Comisiones sueca, americana y alemana, ejemplos, cuyo valor de generalidad no pretendo establecer, de relativa esterilidad de la investigación «de encargo», iniciada bajo la presión inmediata de una necesidad profesional o social. Contra esto, existen centenares de ejemplos en los que el resultado fue favorable, pero me atrevo a afirmar que, en la mayoría, si se estudia el caso con detalle, se encuentra que dichos resultados consistieron, en una parte, tan sólo en un limitado ensanchamiento de la práctica empírica, y, en otra, en un desarrollo de un descubrimiento previo, quizá muy escondido en ocasiones.

Esto no debe llevar de ninguna manera a la idea de que

no hay que prestar oído a las necesidades prácticas. Muy al contrario, creemos que éstas constituyen el medio en el que se engendra el descubrimiento.

EL METODO CIENTIFICO

A partir de los primeros escritos que se conocen sobre el método científico, no ha cesado la discusión acerca de cuál es el adecuado, entre dos caminos distintos, para llegar al conocimiento. El primero es comparable a una creación. Es el impulso que lleva al hombre a construir en su mente una explicación del mundo. Es un camino noble y atractivo, pero la capacidad de la mente humana es limitada, y es dudoso el que se haya llegado así, sin desviarse de su forma pura, mucho más allá de una amplia Aritmética.

La segunda es la que podemos llamar de «polimerización». El hombre, en su quehacer diario, acaba por encontrar a lo largo del tiempo, una solución, buena o no tan buena, a cada uno de sus problemas. A este cuerpo de sabiduría empírica es a lo que llamamos «artes», o mejor, para evitar confusiones, «artesanías». Nadie duda de que este camino puede llegar a grandes resultados: así pueden construirse pirámides y catedrales, y a construir y explotar los complejos sistemas hidráulicos del antiguo Imperio Chino.

Durante muchos siglos, y aun milenios, la situación puede quedar así, aumentando cada vez el gran almacén de conocimiento.

Pero, de vez en vez, en el seno de esta «sopa precientífica» se engendra una hipersolución compleja, cuyo rasgo cualitativo esencial es que demuestra ser capaz de engendrar, a su vez y por sí misma soluciones a otros problemas, muchas veces incluso débilmente conexos y hasta aparentemente desacoplados. Al conjunto de estas hipersoluciones es a lo que llamamos Ciencia.

DESCARTES Y LOCKE. CIENCIA Y TECNICA

Esta definición no satisfará, sin embargo, a los admiradores del método deductivo. Como dice HOLTON (1982) glosando un artículo de Weinberg:

La unificación y síntesis, que, a través de un aumento en la economía del pensamiento nos hace esperar un aumento de la comprensión, es miembro de un conjunto de temata ... Por qué la Naturaleza, con toda su aparente complejidad, es como es. Kepler, que preguntaba en el prefacio de Mysterium Cosmographicum por qué los planetas están a las distancias a las que están, por qué tienen el número y los movimientos que encontramos que tienen, y no otros, habría estado de acuerdo con esta descripción de una de las esperanzas persistentes del hombre.

Esta esperanza subyace, sin duda, en cualquiera de nues-

tras actividades intelectuales, pero hoy nos hallamos lejos de la ingenuidad con la que Descartes veía el futuro desarrollo de su método, comenzando por su famoso principio; como si fuese tan evidente lo que es pensar, y tan claro lo que es ser, y tan ciertas las relaciones entre lo uno y lo otro.

Hasta el primer tercio de este siglo el método cartesiano había tenido éxitos limitados. Su reino era el de las Matemáticas, en donde la mente tiene las mayores probabilidades de aprehender la realidad, puesto que la realidad de que se ocupa es, en puridad, la de los mecanismos lógicos de la propia mente.

Pero aún estos éxitos se oscurecen con el pesimismo postgödeliano de la segunda parte del siglo. No fue suficiente la «retirada estratégica» de Hilbert con sus formalizaciones, ni siquiera la desbandada promovida por Whitehead y Russell al abandonar todo el campo de la Física para encerrarse en el Monte Athos de la Lógica. A este período corresponde la cínica confesión del último cuando dijo: *La matemática pura es un campo de estudio en el que no sabemos de qué estamos hablando, ni tampoco si lo que estamos diciendo es verdadero*. Lejanos quedaron los tiempos en los que Cicerón alababa a sus conciudadanos porque *gracias a los dioses, no son como los griegos y saben limitar el estudio de las Matemáticas al dominio de las aplicaciones útiles*.

Ante este panorama de incertidumbre, no le resulta fácil al técnico el poner mucha esperanza en esta Ciencia de creación, que, en su vocación de pureza, se ha alejado del mundo, hasta casi perder contacto con su realidad y sus problemas.

Pero, al mismo tiempo, por su retirada al amparo de las murallas de la Lógica, han quedado solitarios extensos campos, que antes se encargaban ellos de defender de la invasión de los súbditos del empirismo.

En su origen, fue muy tenue la línea que separaba la Ciencia de la Técnica. Arquímedes destilaba sus preocupaciones científicas a partir de problemas técnicos muy concretos, y esta forma de proceder nunca ha desaparecido desde entonces, recogida por los alejandrinos. Un nuevo ejemplo importante lo constituirán los ingenieros del Renacimiento, y, entre ellos, Leonardo da Vinci, el cual amaba sobre todo a Arquímedes y a la Mecánica, que para él representaba el *paraíso de la Matemática*. Es muy difícil separar, en esa época, al ingeniero del inventor, y a éste del científico.

Las teorías científicas se elaboran, en aquella coyuntura, por ingenieros, que al mismo tiempo son artistas, artilleros, como Tartaglia, o fabricantes de pólvora, como Biringuccio. Son precisamente las observaciones hechas durante la práctica las que estimulan las teorías científicas, y es en el Arsenal de Venecia, y no en ningún cenáculo científico, donde Galileo pronuncia su Discurso en 1638.

Como hace notar MERTON (1967) *hace tres siglos, la actividad científica no era un valor evidente por sí misma. Sin embargo, gracias a una interminable serie de logros, lo instrumental se transformó en lo fácil, el medio en el objetivo. Así fortalecido, el científico llegó a considerarse independiente de la Sociedad, y a considerar la Ciencia como una empresa que se convalida a sí misma, que está en la Sociedad, pero sin ser de ella.*

Es esta una situación relativamente nueva en la historia de la Humanidad, aunque puede considerársele como una versión secularizada de la ciencia mágica oriental o de los guardianes del calendario inca, pero ha sido un gran triunfo el haber podido alcanzar prestigio en los países de tradición grecolatina, que siempre fueron tan refractarios a toda pretensión esotérica.

Quizá por ello, esta situación excepcional no deja de presentar algunos signos de inestabilidad. El mismo Merton dice, en otro lugar: *Los ataques incipientes, pero manifiestos, a la integridad de la Ciencia, han llevado a los científicos a reconocer su dependencia de tipos particulares de estructura social. Una torre de marfil es insostenible cuando sus muros son atacados. Después de un período prolongado de relativa seguridad, durante el cual la búsqueda y la difusión del conocimiento se habían elevado a un lugar descollante en la escala de los valores culturales, los científicos se ven obligados a justificar las acciones de la Ciencia ante el Hombre.*

Esto resulta hoy ineludible por el hecho, también nuevo, del peso económico que la actividad de investigación ha tomado. En el tiempo en el que este peso era pequeño, podía ser aceptado sin una justificación explícita, del mismo modo que se asumían los gastos suntuarios del noble o del soberano. Pero el mismo prestigio de la Ciencia le ha permitido conseguir una parte tal de los recursos económicos del país que es difícil que no provoque preguntas acerca de los resultados obtenidos.

LA VALIDACION POR LA TECNICA

Cada vez más, por otra parte, se toman estos resultados como el más legítimo criterio de titulación de la validez de una teoría. Esto suscita siempre las protestas de muchos científicos, indignados ante tal filisteísmo. Pero la Historia pone ante nuestros ojos largos cortejos de teorías que, una tras otra, fueron primero aceptadas, después desechadas, mientras que hoy endurecemos la arcilla con el fuego igual que lo hacía el hombre primitivo.

Hoy tendemos a pedirle a una teoría que tenga fecundidad, vida, más que el que sea verdadera, ya que, como acabamos de decir, nos sentimos fundamentalmente inseguros de que podamos llegar a saber si realmente lo es. Y esto es lo que permite que ocurra, tal como vemos todos los días, que dos teorías contrapuestas coexistan, y, cuando una prevalece, no es prueba de que ésta fuese verdadera y la otra falsa, sino que una ha sido más poderosa o ha tenido mejor suerte en su enfrentamiento dialéctico.

Un ratón y un gato son tan verdaderos, tan seres vivos uno como otro, aun cuando sus posibilidades sean distintas en el caso de un encuentro.

Tales conceptos son particularmente necesarios para llevar algún ánimo a quienes nos ocupamos de algo tan extremadamente complejo como es el terreno, tanto en su distribución como en su comportamiento. Pero no nos autocompadecemos pensando que los que se ocupan de otras ramas de la Ciencia son invulnerables a estas angustias de la duda. Así, pues, EINSTEIN (1951) escribió:

Las condiciones externas que se manifiestan por medio de los hechos experimentales, no le permiten al científico ser demasiado estricto en la construcción de su mundo conceptual mediante la adhesión a un sistema epistemológico. Por eso tiene que aparecer ante el epistemólogo sistemático como un oportunista sin escrúpulos...

Y, de una manera más concreta y elaborada, FEYERABEND, en una conferencia pronunciada en Roma en 1981, nos dijo, por su parte:

La recomendación (que se remonta a Newton, y que todavía es hoy muy popular) de aceptar una alternativa tan sólo cuando las refutaciones hayan llegado a desacreditar la teoría hasta el momento ortodoxa, equivale a colocar el carro delante del caballo ... Un científico que desee maximizar el contenido empírico de los puntos de vista que sustenta y que quiera comprenderlos tan claramente como sea posible, tiene que introducir, según lo dicho, otros puntos de vista; es decir, tiene que adoptar una metodología pluralista ... Procediendo de esta forma, estará dispuesto a tener en cuenta las teorías acerca del Hombre y del Cosmos que se encuentran en el Génesis ... Quizá descubra entonces que la teoría de la evolución no es tan buena como generalmente se supone, y que debe completarse, o sustituirse por completo, por una versión corregida y mejorada del Génesis. Concebido de esta forma, el conocimiento no consiste en una serie de teorías autoconsistentes que tienden a converger en una perspectiva ideal, no consiste en un acercamiento gradual hacia la verdad. Por el contrario, el conocimiento es un océano, siempre en aumento, de alternativas incompatibles entre sí (y tal vez inconmensurables) ... No hay nada establecido para siempre, ningún punto de vista puede quedar omitido en una explicación comprensiva ... Plutarco, Diógenes, Laercio y no Dirac, o von Neumann, son los modelos que representan un conocimiento de este tipo en el que la historia de una rama de la Ciencia se convierte en parte inseparable de la Ciencia misma.

Debemos reflexionar profundamente sobre estos párrafos de Feyerabend, aun cuando, como con todos los escritos de este autor, tengamos que buscar la estructura debajo de los adornos barrocos de su habitual exaltación.

LAS CRISIS CIENTIFICAS

Y es cierto que la historia de la Ciencia es la de las

luchas por el predominio de unas teorías sobre otras, más antiguas; luchas que pueden enmarcarse dentro de un esquema, que merece la pena examinar.

Este examen puede conducirnos a interpretaciones muy diferentes, según el estado de ánimo con el cual lo emprendamos. Así pues, la versión triunfalista, la más común y la más superficial, nos presenta a la teoría prevaletiente como dotada de una mucho mayor generalidad que la antigua. El campo de cuestiones que la nueva teoría puede responder es mucho mayor, y los desarrollos futuros son extensísimos.

Pero, pasado algún tiempo, o bien según un examen más crítico, se llega a comprobar que la nueva teoría explica mejor tan sólo una parte de las cuestiones cubiertas por la antigua, por lo que es muy frecuente que se llegue a una síntesis de las dos. La teoría antigua no siempre ha sido desechada, sino que ha sido metabolizada. Los desarrollos futuros siguen pareciendo importantísimos, lo cual es fácil de aceptar, ya que se trata de un futuro.

Pero algunos podrán pensar que la teoría antigua también tenía posibilidad de desarrollos futuros, quién sabe si tan importantes y, en todo caso, probablemente diferentes, que los de la nueva teoría. Y del mismo modo que se piensa que es importante no desperdiciar material genético, aun el que parezca más inadaptado a las circunstancias actuales, pues quizá en él se encuentre la clave de la adaptación a circunstancias futuras, no debemos olvidar las teorías derrotadas, siguiendo el consejo de Feyerabend, de que la historia de la Ciencia es parte de la Ciencia misma.

No estará de más anotar que, en general, la teoría derrotada no experimenta desarrollos ulteriores, pero que esto no ocurre por puras causas racionales, sino por otras mucho más materiales y administrativas, que canalizan compulsivamente la búsqueda de nuevos hechos en una dirección. Los posibles continuadores de la teoría precedente difícilmente encontrarán créditos para sus experimentos, y las revistas prestigiosas no admitirán sus trabajos en sus reverenciadas páginas, bien protegida de cualquier herética desviación por sus expertos.

Siendo la historia de la Mecánica del Suelo muy reciente, podemos rastrear este fenómeno de la canalización mucho mejor que en la Física o la Química, por ejemplo: no puede negarse que la ascensión de la Mecánica del Suelo tuvo como consecuencia un cierto abandono de la actitud naturalista, observacional, respecto a los fenómenos del terreno. Es claro, y muchas veces se ha dicho, que el mismo Terzaghi fue consciente de este perjudicial efecto secundario, y así, dedicó sus últimos años de actividad docente a la Ingeniería Geológica. Pero esto no fue suficiente para reparar el daño, y hubo un momento en que el cuerpo de doctrina disponible tan sólo podía aplicarse a las Arcillas Azules y a las Arenas Limpias. Y era más práctico rebuscar los antiguos libros, con sus tablas empíricas de cargas admisibles, cuando nos encontrábamos

con un caliche, o con la creta, el loess, el albero, la laterita o incluso el amplísimo universo de los suelos semisaturados.

Por otra parte, en cierto momento, llegamos a olvidar que existían movimientos espontáneos del terreno que no consistían en corrimientos, preferentemente circulares. Y, por otro lado, el elegante y detallado desarrollo de la teoría de la consolidación de Terzaghi, debido a la capacidad matemática de Fröhlich (TERZAGHI y FRÖHLICH, 1936) dejó en la sombra la teoría de BUISMAN (1936), con lo cual la consolidación secundaria quedó relegada al papel de ese pariente pobre que todo el mundo sabe que está, pero que se procura que aparezca poco en las visitas. Lo cual resulta curioso, porque parece que Terzaghi fue movido a preocuparse por la consolidación diferida ante el caso de la catedral de Königsberg, que sigue asentando desde 1333, fenómeno que, evidentemente, no tiene nada que ver con la teoría hidrodinámica.

En cuanto a la aparición de la Mecánica de las Rocas, puede parecer un cisma sin sentido para un espectador alejado, pero tuvo su justificación en el desinterés, e incluso apartamiento de cualquier problema, programa o investigación que se refiriera a esa clase de materiales.

LAS INSTITUCIONES TECNICAS DE INVESTIGACION

Todo esto puede traducirse en razones para la existencia de unas instituciones que estén integradas en la estructura de los organismos ejecutores, en este caso, de las Obras Públicas, de modo que resulte imposible el que se mantengan en la ignorancia, o aun en la indiferencia, de los problemas reales.

Es preciso no dejarse sugestionar por el sofisma de que una institución así debe dedicarse a la Ciencia Aplicada, tras de lo cual se pasa a considerar a ésta una ciencia menor, de puro desarrollo o control, sin mordiente para conseguir un avance verdadero del conocimiento. Este es consecuencia de la polimerización, y esto es tan probable, o quizá más, en un conjunto de hechos acopiados a partir de hechos reales, sin previa canalización, que en las series de resultados de unos experimentos, consecuencia de un plan diseñado para probar o refutar un paradigma prejuzgado.

No existe Ciencia Aplicada, porque la Ciencia es única, ya que único es el Universo. Lo que sí existen son aplicaciones de la Ciencia, y cada una de ellas vale por un experimento, siempre que se observe con espíritu científico. La enorme masa de solicitudes que un Ministerio como el de Obras Públicas, hoy también de Urbanismo, impone sobre el mundo material, implica un torrente de resultados, de reacciones, de un valor inmenso, tal como no lo pudieron soñar Arquímedes o Galileo. Su explotación no necesita medios excesivos, sino principalmente guía y espíritu.

Es difícil llevar a cabo esta misión: las respuestas de tan gran número de solicitudes no componen un conjunto acordado, sino un ruido confuso. Hay una fuerte tentación de concluir que es un ruido blanco del que no puede extraerse ninguna consecuencia.

Pero esto no es así, y hoy, más que nunca, no podemos aceptarlo, cuando hasta los íntimos secretos de la vida empiezan a quedar encerrados en códigos genéticos, cualitativamente comparables a aquellos con los que alimentamos nuestras computadoras.

Sin embargo, desde el punto de vista cuantitativo, esta estructura matemática nos resulta inaprehensible dentro de la limitada condición humana, y, no de manera distinta a cuando el poeta enlaza palabras, que tan sólo lejanamente pueden representar sentimientos, los tratamientos matemáticos que somos capaces de formular tan sólo pueden simbolizar modelos simplificados de la realidad. La validez de lo que así se consigue puede ser muy diferente en cada caso, aunque habitualmente no queda justificado el pesimismo de Goethe, para quien muchos fenómenos físicos eran entidades elementales, atributos inescrutables de la creación. Y decía: *Las matemáticas son como los franceses; todo cuanto se les dice lo traducen a su idioma transformándolo en algo completamente distinto.*

Los que nos dedicamos a la Mecánica del Suelo luchamos de continuo por no separarnos de la pluralidad de la parte del Universo que es objeto de nuestro estudio pero, muy a menudo, la imagen que conseguimos es tan borrosa que llegamos a preguntarnos si tiene algún nexo con el mundo exterior.

Pero, en esta noche oscura de la inteligencia hay algo que nos salva, y es la Técnica. Esa Técnica, hoy más cerca que nunca de la Ciencia, legitima nuestras concepciones, nuestros cálculos, nuestras teorías. No son combinaciones soñadas las nuestras, porque los sueños no levantan diques, ni excavan túneles, ni soportan edificios.

La Técnica es hoy, cuando hemos visto caer tantas brillantes concepciones del mundo, la última justificación de la Ciencia, y las teorías de Einstein tan sólo han dejado de parecer geniales paradojas cuando las centrales nucleares han comenzado a producir millones de kilovatios.

Pero, en este último ejemplo es en el que está contenida otra característica de la moderna actitud frente al quehacer humano: de cómo una idea científica puede vitalizar de un modo inicialmente impensable un conjunto de aplicaciones prácticas.

Así pues, los diferentes elementos que hemos ido examinando se articulan en el ciclo tecnológico que es preciso que fluya ágil y eficazmente, si queremos que la Ingeniería sea capaz de superar el desafío de cubrir las necesidades futuras del país. Y este fluir tan sólo puede lograrse con una proximidad entre los organismos científicos y los ejecutores.

La aceleración del citado ciclo sería suficiente para justificar su existencia. En alguna ocasión se ha demostrado que la diferencia entre el tiempo necesario para la puesta en práctica de una innovación, llevada a cabo por una institución integrada, o por una separada, es de más de dos años. Tan sólo esta razón implica el disponer de un capital suplementario de dos años de conocimientos.

Pero esto no es lo más importante. Una institución independiente recibe la información de los resultados, siempre de una manera incompleta y con retraso. Siempre le llega a través de un filtro, a veces excesivamente crítico, otras, adulador, y siempre, de una manera u otra, censurado.

La observación de las reacciones del medio natural es una parte fundamental del método científico; más aún, es la única parte autosuficiente, ya que muchos de los avances se han efectuado tan sólo contando con este medio. Es, por otra parte, donde más diferencia puede haber entre que se haga rutinariamente o con espíritu analítico, por lo cual la facilidad, o mejor, la obligatoriedad de la presencia de la institución integrada de investigación hace toda la diferencia.

En el caso de las Ciencias del terreno, entidad tan varia y heterogénea, tan reluctantante a dejarse encerrar en esquemas abstractos, esta posibilidad de observación directa de los resultados de la aplicación es más necesaria, quizá, que en algunas otras ramas de la Técnica.

La Geotecnia, apartada de lo que pudiéramos llamar actividad «clínica», deriva hasta ser una rama más de la Mecánica de los Sólidos, pero probablemente una de las de menor validez, no sólo práctica, sino también científica, dado que los suelos son pseudosólidos, con procesos fisicoquímicos que influyen en su comportamiento de manera en ocasiones predominante.

La tentación de olvidarnos de estas circunstancias nos conduce a una actitud que es puramente regresiva. Es simplemente volver a los tiempos preterzaghianos de Boussinesq y Rankine, aunque se nos presenten disfrazados, revestidos con los ricos ropajes de los programas de computador.

Si hoy la Geotecnia es un ente vivo, es decir, capaz de engendrar soluciones a problemas antes nunca propuestos, nuevos procedimientos y nuevas tecnologías, es porque ha llegado a componerse de unas largas cadenas, en las que encontramos trozos de teorías matemáticas, otros de Mecánica (el paraíso de Leonardo), muchos de Geología, pero también alguno de Botánica, largos sectores de Fisicoquímica y todo ello organizado dentro de una membrana, también activa, de Tecnología. Y, de la misma manera que resulta muchas veces más fácil para combatir a una célula actuar sobre su membrana que intentar penetrar hasta sus cromosomas, no habría manera más sencilla de esterilizar la Geotecnia que el dejar que se momifique su membrana de tecnologías, lo cual no puede ocurrir si existe una integración con los organismos ejecutores.

Bicentenario de Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), eminente ingeniero de minas-geólogo.

Por F. J. AYALA CARCEDO (*)

Se celebra este año, 1993, el Bicentenario de Joaquín Ezquerro del Bayo (1793-1859), eminente ingeniero de minas-geólogo, quizá la figura más importante de la Minería y la Geología de mediados del siglo pasado, tras el fallecimiento en 1833 de Fausto Elhúyar y de Súbice, descubridor del volframio con su hermano Juan José y verdadero arquitecto de la organización de la Minería española y mexicana en el siglo XIX. Con este motivo, el presente artículo analiza, en el marco socioeconómico que le tocó vivir, sus contribuciones al progreso técnico y científico de España.

BIOGRAFIA Y AMBIENTE

La vida de Joaquín Ezquerro del Bayo hasta los 31 años fue azarosa, en buena medida debido a las circunstancias de la Historia de España en ese período (1793-1824). Nacido en Ferrol, era hijo de un capitán de navío natural de Tudela, muerto en su barco en el asedio a Tarifa (1801) y de una noble dama zamorana. Para premiar el comportamiento de su padre, Carlos IV le nombró en 1802 «Cavallero Page del Rey», permaneciendo desde los 8 a los 16 años en el Colegio, donde destacó por su inteligencia y aplicación.

En 1810, inmersa España por la invasión francesa de Napoleón en la Guerra de la Independencia (1808-1814), especialmente desastrosa para el país por múltiples razones, tiene que pasar a Francia, donde permanece hasta la Restauración de Fernando VII en 1814. Al regreso, con

(*) Dr. Ingeniero de Minas (Ingeniería Geológica). Instituto Tecnológico Geominero de España. Miembro de INHIGEO (UNESCO).

20 años, se encuentra en una penosa situación económica con dificultades para sostener a su madre viuda, por lo que solicita al Rey una pensión, obteniéndola en 1817.

Tal y como ha señalado LOPEZ DE AZCONA (1984), no debió agradarle la salida fácil en sus circunstancias, la de las armas, decidiendo ingresar en la Escuela de Caminos y Canales en 1821 y obteniendo el título de Auxiliar en 1822. Son tiempos de cambio e inestabilidad política: el Trienio Constitucional iniciado en 1820, acabará en 1823 con otra intervención francesa, ésta de signo conservador, a petición de Fernando VII a la Santa Alianza, la de los «Cien mil hijos de San Luis», y la represión política, que alcanzaría a unas 100.000 personas según el historiador BALLESTEROS. Consecuencia de esto sería el cierre de la Escuela de Caminos, la anulación de la pensión real y el destierro por un año de Ezquerro, que pasa a Francia. Allí adquiere una gran habilidad como dibujante que utilizaría en sus *Elementos de Laboreo de Minas* en 1839 y en su trabajo en el estudio del pintor Vicente López.

A partir de 1826, su trayectoria se encamina definitivamente por el camino de la Técnica primero y la Ciencia después. A pesar de que España no encuentre su equilibrio político durante toda la vida de Ezquerro (nueve años después de su muerte se produce la Revolución de Septiembre de 1868 que destrona a Isabel II), él va decidiendo su destino: contribuir al progreso de España en su desarrollo técnico y científico, minero y geológico. Tras dirigir las fábricas de vidrio de Aranjuez (1826-27), es comisionado en 1828 a la recién creada Dirección General de Minas (1825).

En 1830, siguiendo la sabia política diseñada por Fausto Elhúyar, va pensionado a la Academia de Minas de Freiberg donde se forma como ingeniero de minas, ingresando

en el Cuerpo de Ingenieros de Minas en 1835, a los 41 años. Hasta su muerte en 1859 a los 65 años, el mismo año que otro eminente ingeniero de minas, HUMBOLDT, este período verá sucederse una intensa actividad en estudios y trabajos que le darían un justo renombre entre sus contemporáneos y la condición de académico fundador en 1847 de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Madrid. Fue asimismo miembro de tres Sociedades Económicas, la de Baden, Matritense y Tudela, así como miembro de las Sociedades Geológicas de Londres y Francia.

Su actividad docente, principalmente en la Escuela de Minas, dependiente de la Dirección General del ramo, que

simultaneó al igual que harían Mallada, Amar de la Torre, Naranjo, Maestre y otros miembros de las Comisiones de la Carta (1849) y Mapa Geológico (1870), con su trabajo profesional, se realizó también en otra Institución; así en 1826, es ayudante de la Cátedra de Física del Conservatorio de Artes, desempeñando la Cátedra durante un Curso (1839-40). De 1836 a 1844, fue profesor de Mecánica Aplicada y Laboreo de Minas en la recién creada Escuela de Minas de Madrid.

Ezquerria, que había residido en Francia y Sajonia y viajado por otros países europeos, fue hombre de ideas liberales, que en su juventud le llevaron al destierro. Esta ideología estaba extendida entre los ingenieros de minas de su época, como desde fines del XIX lo estaría el regeneracionismo, con figuras como Mallada, y así podrían citarse su amigo Amar de la Torre, miembro de la Milicia Nacional progresista; Luján, diputado y ministro; Casiano de Prado, preso en su juventud por la Inquisición, o el mecenas Gómez Pardo, y ya en la América independiente, Andrés Manuel del Río. Es bien conocida por otra parte



Figura 1.—Joaquín Ezquerria del Bayo, ingeniero de minas-geólogo (1793-1859).

DATOS Y OBSERVACIONES

SOBRE

LA INDUSTRIA MINERA,

CON UNA DESCRIPCION CARACTERISTICA

DE LOS MINERALES ÚTILES,

CUYO BENEFICIO PUEDE SER OBJETO DE LAS EMPRESAS.

POR

El Sr. D. Joaquin Ezquerria del Bayo.

Inspector general de minas, profesor en la escuela especial del ramo, miembro de la sociedad geológica de Francia, de la sociedad económica del gran Ducado de Baden, de la sociedad económica de Tudela de Navarra, etc.



MADRID, 1844.

EN LA IMPRENTA DE D. ANTONIO YENES,
calle de Segovia, número 6.

Figura 3.

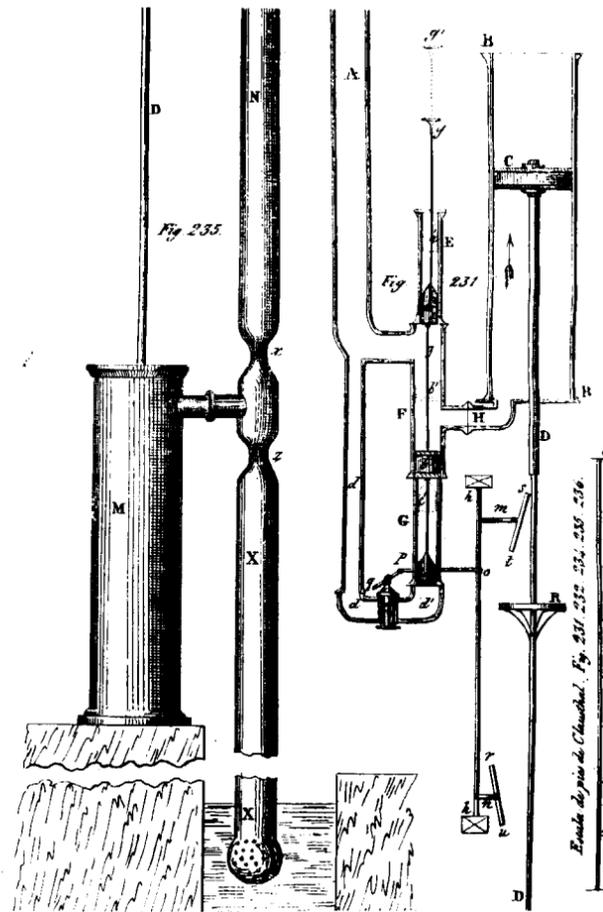


Figura 4.—Bombas de desagüe de minas (en *Elementos de Laboreo de Minas*, 1839).

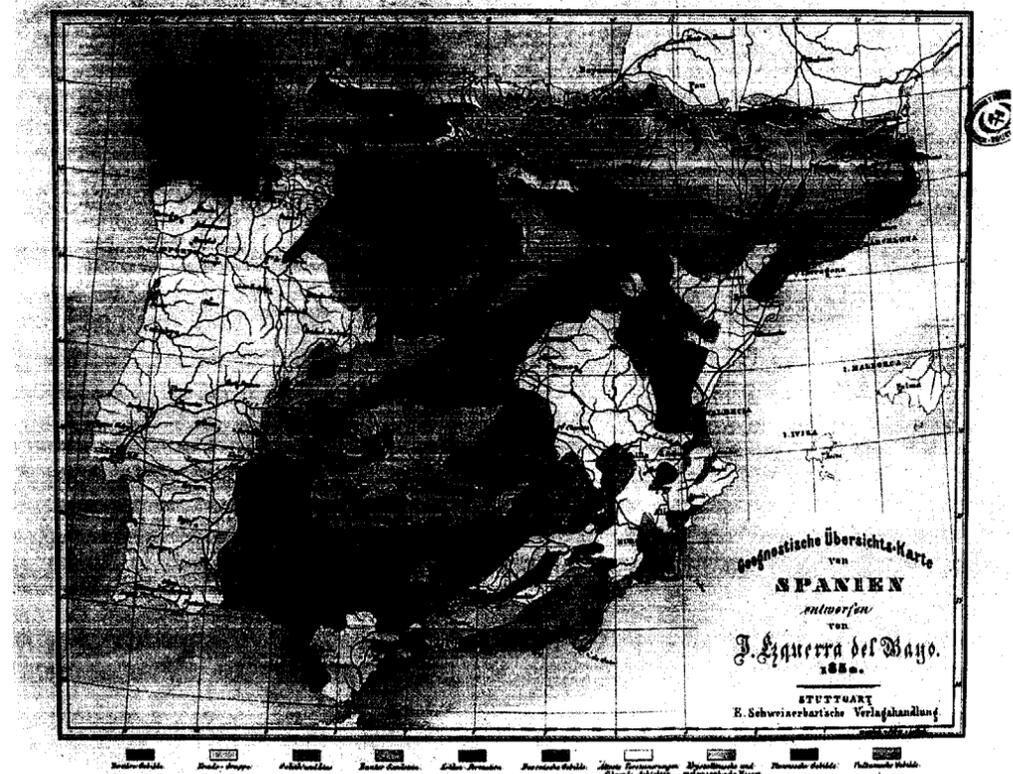


Figura 2.—Primer Mapa Geológico de la España Peninsular, realizado por Ezquerria del Bayo en 1850 y publicado en Stuttgart en 1851 (*Geognostische Übersichtskarte von Spanien*).



Joaquín Ezquerro del Bayo

Figura 1.—Joaquín Ezquerro del Bayo, ingeniero de minas-geólogo (1793-1859).



Figura 2.—Primer Mapa Geológico de la España Peninsular, realizado por Ezquerro del Bayo en 1850 y publicado en Stuttgart en 1851 (Geognostische Übersichtskarte von Spanien).

la vinculación de Fausto Elhúyar a la Masonería, presente en casi todas las corrientes antiabsolutistas, en su juventud y la etapa mexicana, aunque su actividad no fue intensa en este campo. Buena parte de los más ilustres ingenieros de minas de la primera mitad del XIX, eran claramente contrarios al absolutismo, y Ezquerro no fue

una excepción. Ezquerro creía que el comercio era fundamental para la prosperidad de las naciones como expone en el prólogo a sus *Elementos de Laboreo de Minas*. PRADOS DE LA ESCOSURA (1988) ha demostrado el papel positivo para el desarrollo del país en el XIX de la exportación de minerales, confirmando la idea de Ezquerro.

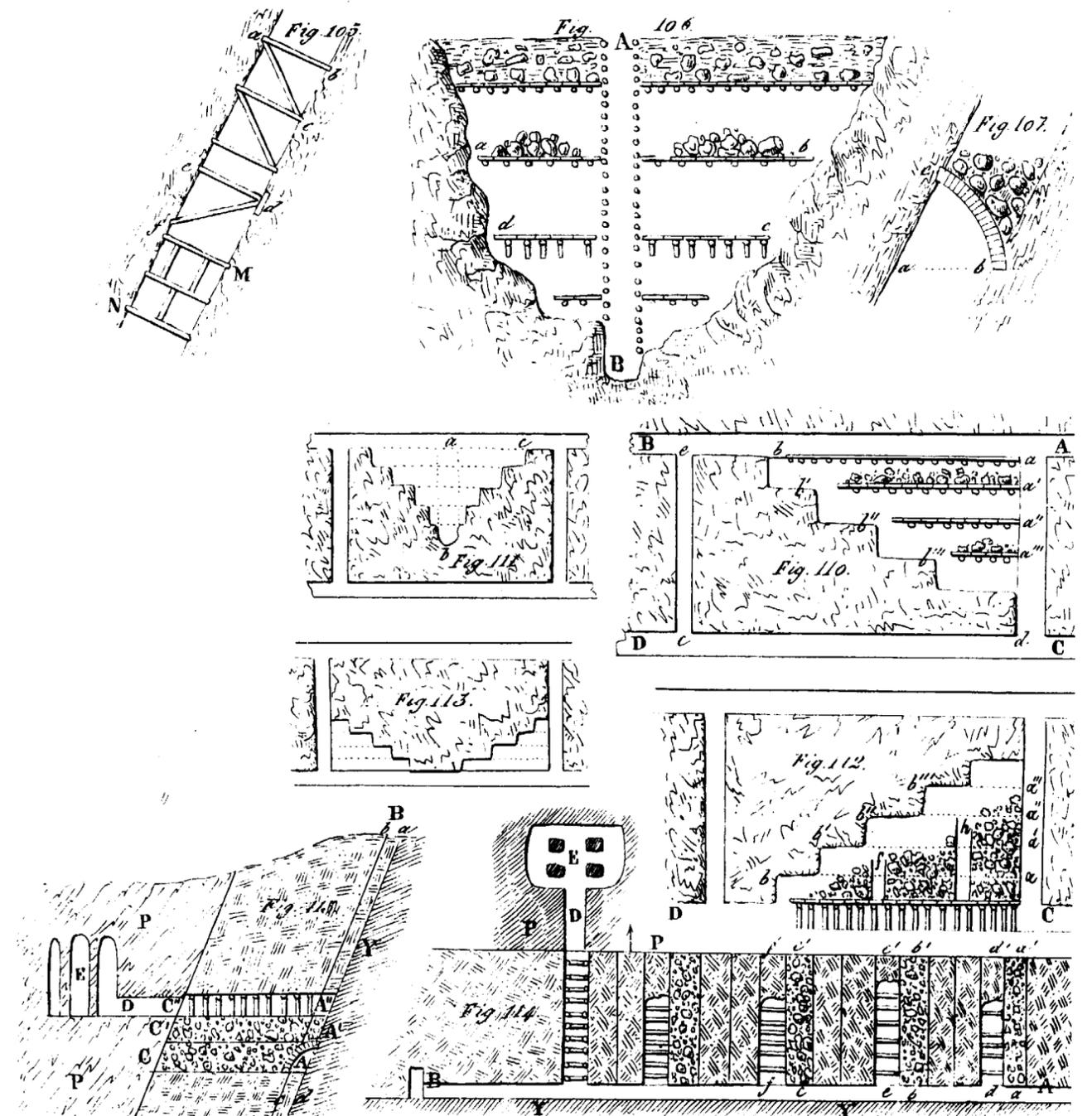


Figura 5.—Métodos de explotación (en *Elementos de Laboreo de Minas*, 1839).

EZQUERRA Y LAS INGENIERIAS MINERA Y CIVIL

Antes de su plena dedicación a la Minería y las disciplinas conexas, Ezquerria realizó algunos trabajos en su condición de auxiliar de caminos. Así, en 1822 trabajó en la nivelación Burgos-Reinosa con vistas a un proyecto de canalización. En 1829, trabajaría en el estudio de sistemas de transporte del carbón asturiano a puerto y en el proyecto de traída de aguas del Guadalix y el Lozoya a Madrid.

Los años treinta del siglo XIX presencian un impulso espectacular de la minería metálica española, hasta entonces eclipsada, salvo Almadén, por la de la América española, independizada en el período 1816-1824 tras las insurrecciones criollas que comienzan prácticamente con la quiebra política del Estado Español producida tras las abdicaciones de Bayona y la Guerra de la Independencia. Mallada, que califica este período de «furor minero», dice al respecto: *No quedó monte, ni cerro, ni cañada, ni rincón por explorar y registrar, y por más de media España, no docenas de minas, sino miles, por luengos siglos abandonadas, volvieron a entrar en labores con alocada actividad, sin contar los infinitos pocillos, calicatas y socavones en yacimientos nunca explorados. En medio de lo que tuvo de abusivo, aventurado y hasta necio y grotesco, ese período de furor minero fue de positivos resultados para la Minería, de rechazo para la Geología, y en último extremo para la cultura nacional.* Es la época de los descubrimientos plumbo-argentíferos de Sierra Almagrera (1838) y Hiendelaencina (1840). En 1851, fecha de la segunda edición de sus *Elementos de Laboreo de Minas*, Ezquerria confirma la prosperidad del sector, cuando dice *hemos llegado a ser una de las naciones más productoras en este ramo.*

Ezquerria hace una aportación fundamental a la Ingeniería Minera española, publicando en 1839 sus *Elementos de Laboreo de Minas precedidos de algunas nociones de Geognosia y la descripción de varios criaderos de minerales, tanto de España como de otros reinos de Europa.* Se trata de una obra de 444 páginas con numerosas láminas realizadas por él mismo, cuya segunda edición, de 584 páginas, con 16 láminas plegadas, verá la luz en 1851.

Comienza con las nociones de Geognosia y Criaderos, que serán comentadas más adelante, estructurándose en tres partes. La primera trata de *hacer y fortificar las escavaciones*, describiendo las operaciones de arranque y sus instrumentos, los medios de fortificación (entibación, mampostería, bóvedas, etc.), labores de acceso (socavones y pozos) y de beneficio (cielo abierto, hundimientos, relleno, disolución). La segunda, *hacer transitables y habitables las escavaciones*, describe los caminos subterráneos, el desagüe, la ventilación, la iluminación, el traje de los mineros y la organización del trabajo. La tercera, *estraer los minerales de las escavaciones* describe los medios de transporte, los «caminos de hierro», la navegación por canal con ejemplos alemanes e ingleses (España quedó al margen

de este tipo de navegación por lo accidentado del relieve, lo cual repercutió significativamente en su desarrollo) y la extracción por pozos verticales e inclinados, examinando los costes en todos los casos. La edición de 1851 incorpora Adiciones sobre las Leyes Mineras en diversos países y Tablas de Medidas entre otras.

Comentando su acogida, Ezquerria expone en la segunda edición: *He tenido la satisfacción de que haya merecido la aprobación unánime de todos los profesores a cuya noticia ha llegado, tanto del reino como extranjeros.* A la hora de exponer ejemplos, utiliza tanto casos centro-europeos como españoles (Almadén, Río Tinto, Alpujarras).

Este tratado fue el más utilizado en el siglo XIX en España, comprendiéndose la importancia de esta aportación por el hecho de que la Minería representó casi la tercera parte de las exportaciones españolas en ese siglo y un significativo impulso al desarrollo vía impuestos y desarrollo regional.

En 1844 realizó un análisis global del sector minero con su *Datos y observaciones sobre la industria minera con la descripción característica de los minerales útiles*, un volumen de 353 páginas con láminas, con análisis de la Minería en diversos países y aspectos técnicos, económicos y mineralógicos del sector. En 1852 publicaría su *Memoria sobre las minas nacionales de Río-tinto*, presentada al Gobierno en un volumen de 109 páginas. Previamente, en 1851, había sido comisionado para visitar los establecimientos mineros de Bélgica, Sajonia, Suecia y Noruega.

Dirigió técnicamente la explotación del yacimiento del barranco Jaroso en Sierra Almagrera, publicando sendos informes en 1843 y 1850.

En 1844 publicó breves descripciones mineras de las provincias de Palencia y Zamora en el Boletín de Minas.

EZQUERRA Y LA INGENIERIA GEOLOGICA

Al igual que el resto de los ingenieros geólogos del siglo XIX, Ezquerria realizó aportaciones en dos campos de la Ingeniería Geológica: la Prospección Minera y las Aguas Subterráneas.

En 1829-30, la Comisión de Ingenieros de Minas designada para el reconocimiento de Asturias, de la que formaba parte Ezquerria, realizó varios cortes geológico-mineros de las cuencas hulleras asturianas, publicados en 1831 en Madrid.

En 1835 fue comisionado para un estudio de Extremadura y Castilla la Vieja orientado al alumbramiento de aguas artesianas, únicas profundas aprovechables entonces por el pobre desarrollo de la tecnología de bombeo.

Sus contribuciones fundamentales fueron, sin embargo,

MEMORIAS

SOBRE

LAS MINAS NACIONALES DE RIO-TINTO,

PRESENTADAS AL GOBIERNO DE S. M.

por Don Joaquin Ezquerria del Bayo,

á consecuencia de las diferentes visitas que, de real orden, ha hecho á aquel establecimiento, con algunos otros documentos relativos al mismo objeto, mandados imprimir bajo los auspicios

DEL EXCMO. SEÑOR DON JUAN BRAVO MURILLO.

ACOMPANA UNA GRAN LÁMINA LITOGRAFIADA DE LA TOPOGRAFIA DEL TERRENO ACOTADO PARA DICHAS MINAS.



MADRID.

IMPRENTA DE LA VIUDA DE D. ANTONIO YENES,
Plaza del Progreso, número 15.

1852.

Figura 6.

al campo de la Prospección Minera. Los *Elementos de Laboreo de Minas* comienzan con 80 páginas que contienen, aparte de 21 páginas con las principales «ideas sobre la Geología», una exposición coherente y sistemática de los principales tipos de criaderos de acuerdo con el estado de los conocimientos en 1839. Clasifica los criaderos de la siguiente forma: filones, vetas, criaderos en árbol, venas y agujas, criaderos en masa, criaderos en stockwerk, criaderos en capas, criaderos en bolsas, nidos y riñones, y criaderos en arenas y en terrenos modernos de acarreo. Se trata de *la primera exposición sistemática de criaderos publicada en España* (a nivel mineralógico, otros dos ingenieros de minas eminentes, Juan José Elhúyar y Andrés Manuel del Río, habían realizado en la América española los primeros tratados geológicos en español sobre Mineralogía), y no se limita ni mucho menos a exponer lo aprendido en Freiberg, ya que describe los principales yacimientos españoles, de Cartagena a Sierra Morena, pasando por San Juan de las Abadesas, Asturias y Hiendelaencina entre otros, junto a yacimientos

como Clausthal (Hannover) o Brasil. Con ello confirma su valioso trabajo de recopilación y síntesis, al igual que en el resto del libro.

En 1844 publica su *Descripción geognóstica y minera de los criaderos de Santa Cruz de Mudela y Sobre el carbón de piedra de Castilla la Vieja.*

En los cinco opúsculos que constituyen su *Ensayo de una descripción general de la estructura geológica del terreno de España en la Península* (1850-57) al describir los diversos terrenos se incluye sistemáticamente un capítulo sobre sus criaderos minerales, formando conjuntamente la primera síntesis científicamente ordenada de yacimientos minerales de España, una labor que entre 1881 y 1883 actualizaría Lucas Mallada con sus 90 artículos sobre la riqueza mineral de España publicados en el diario *El Progreso*.

La labor de Ezquerria, Casiano de Prado, Schultz, Naranjo, Maestre, Pellico y otros, llevó a Mallada a decir con razón en 1895 que *apenas había individuo del Cuerpo de Minas que no se aplicase más o menos atento al estudio de los criaderos minerales, dando generalmente a la imprenta el fruto de sus observaciones.*

EZQUERRA Y LA GEOLOGIA DE ESPAÑA

Al exponer Lucas Mallada en su discurso de ingreso a la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales en 1895 *Los progresos de la Geología en España durante el siglo XIX*, diagnostica así el estado de España cuando Ezquerria principia su labor minera y geológica, antes de la creación de la Comisión de la Carta Geológica en 1849, fruto de la iniciativa de Rafael Cavanillas, ingeniero de minas y Director General del ramo: *Europa entera avanzó rápidamente en todos los ramos del saber humano..., excepto España, que seguía estacionada, marcándose su atraso de año en año con mayores diferencias: sobresalian entre nosotros enjambres de políticos y de literatos, y apenas se veía un hombre científico. La Geología, sin embargo, fue entre todas las ciencias una de las que más pronto salieron de tan afrentoso marasmo y abandono, lo cual fue debido a la industria minera y a los fundadores del Cuerpo de Ingenieros de Minas, quienes, de grado o por fuerza, tenían que fijar sus miradas en los caracteres petrológicos y estratigráficos de nuestras montañas.* Institucionalmente, ya antes de la creación de la Comisión, las Inspecciones de Minas debían preparar (O. M. de 28-6-46) Colecciones Geológicas con el fin de ir haciendo la Carta Geológica del Reino, de acuerdo con las ideas de Cavanillas. Ezquerria del Bayo, tendría un papel fundamental, junto a Schultz, Casiano de Prado, Amalio Maestre, su amigo Amar de la Torre y otros, en el impulso dado al conocimiento geológico de España en este período, junto a ilustres geólogos extranjeros como Verneuil y Colomb. El propio Mallada reconoce el papel clave de

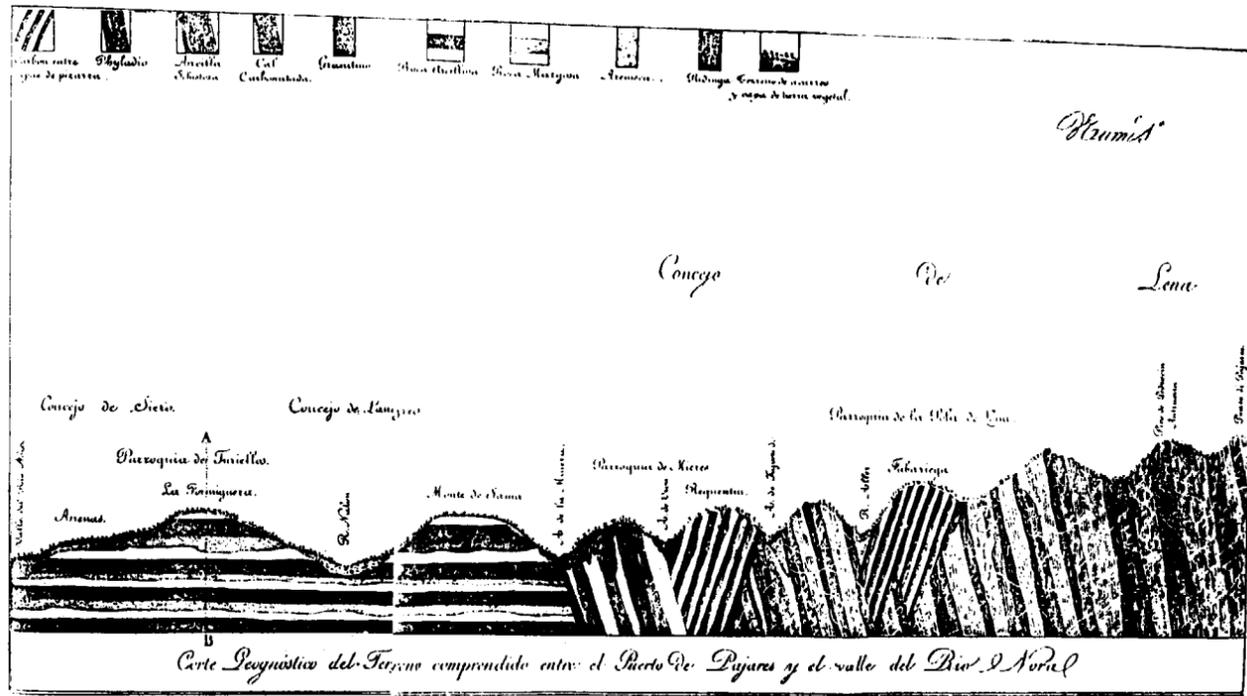


Figura 7.—Corte Geognóstico realizado con Bauzá, Amar de la Torre y García en Asturias en 1829.

Ezquerria al decir que bien pronto el ilustrado profesor Ezquerria del Bayo, ..., se distinguió entre todos por su infatigable laboriosidad y por su plausible celo en cuanto se relaciona con la Geología, con la Minería y con la enseñanza.

El marco en el que se desenvuelven entonces los trabajos de levantamiento geológico es difícil: a menudo no existen mapas topográficos adecuados (Schultz tendrá que levantar uno en Asturias y Luján organizar la triangulación de la provincia de Madrid), el país está en guerra civil debido a los sucesivos levantamientos carlistas (1833-39 y 1846-48), y hasta fines de los años 50, a la muerte de Ezquerria, no se dispondrá de una mínima red de ferrocarriles. Añádase a esto la incompreensión casi general hacia su labor y los escasos presupuestos y medios, y se tendrán los elementos para valorar adecuadamente la labor de los ingenieros de minas-geólogos y naturalistas-geólogos, especialmente extranjeros, en los años 30, 40 y 50 del pasado siglo, que sacaron a España del atraso en este campo.

Ezquerria realizó estudios geognósticos, como entonces se decía siguiendo la tradición alemana, de Palencia y Zamora publicados en 1844, y según Mallada también de Navarra, Sur de España, cuenca del Duero y Moncayo, aparte los relacionados con la Prospección Minera. También publicó en 1837 en el periódico *El Español* (en el cual escribía por esos mismos años Espronceda artículos polí-

ticos desde la corriente demócrata del progresismo acaudillado por Espartero), *Sobre los terrenos terciarios de España*, en dos números, otra prueba más de su talento divulgador. Sin embargo, sus aportaciones fundamentales fueron de otra índole.

En 1847, traduce la primera edición de los *Elementos de Geología*, de LYELL, introduciendo numerosas anotaciones con casos españoles y las aportaciones de Lyell en la segunda edición salvo sus copiosos ejemplos. Se dispone así por primera vez en lengua española de un texto realmente moderno con el que, en palabras del propio Ezquerria *la Geología ha perdido todo lo que tenía de fabuloso y de inconcebible, adquiriendo una sencillez que, no por eso deja de ser más admirable y más sorprendente*. Esta traducción, que al igual que sus *Elementos de Laboreo* son la prueba de su vocación docente y divulgadora, tiene un valor fundamental para el progreso posterior de las Ciencias Geológicas en España, ya que por entonces sólo existían a nivel de la Geología General dos textos en castellano, realizados por sendos ingenieros de minas-geólogos, ambos de 1841. El primero el de FRANCISCO DE LUJAN (1798-1857), *Lecciones de Geología*, impartidas en la Sociedad de Instrucción Pública; el segundo, el de ANDRES MANUEL DEL RIO (1764-1849) *Manual de Geología*, publicado en México. RAFAEL AMAR DE LA TORRE (1802-1874), había realizado unos Apuntes para uso en la Escuela de Minas de Madrid de *Geognosia*, en 1845.

1. Post-plioceno y formación actual.
 2. Plioceno (*antiguo y moderno*).....
 3. Mioceno.....
 4. Eoceno.....
 5. Cretáceo.....
 6. Arenisca verde.....
 7. Vealdiano.....
 8. Oolita superior.....
 9. Oolita intermedia.....
 10. Oolita inferior.....
 11. Lias.....
 12. Arenisca roja moderna superior.....
 13. Arenisca roja moderna inferior y zechstein..
 14. Ulla ó carbonífero.....
 15. Arenisca roja antigua y devoniano.....
 16. Siluriano superior.....
 17. Siluriano inferior.....
 18. Cambriano y fosilíferos antiguos.....
- } Grupo terciario.
} Grupo secundario.
} Fosilíferos primarios ó de transición de algunos autores.

Figura 8.—Cronoestratigrafía empleada por Ezquerria en 1850 en su *Ensayo de una descripción general de la estructura geológica del terreno de España en la Península*, tomada de Charles Lyell.

Comentando algunos de los problemas suscitados por la traducción, hace algunas reflexiones sobre terminología que conservan plena validez. Dice así que *en materia de ciencias no hay patria ni nación particular... y, ya que no es posible el que todos los hombres hablemos una misma lengua, como sería de desear, procuremos al menos los naturalistas entendernos unos con otros, empleando una especie de lengua franca*. Este es el criterio que sigue para la nomenclatura cronoestratigráfica moderna en castellano, alumbrando muchos términos familiares para nosotros como Cambriano, Siluriano, Devoniano, Lias, Cretáceo, Eoceno, Mioceno y Plioceno, términos que se utilizarían en adelante en los mapas geológicos realizados por ingenieros de minas-geólogos. Ezquerria, en el caso de términos como Cambriano (de Cambrian), aparte del criterio de corrección lingüística, obvia, ya que se trata de adjetivos gentilicios (relativos a pueblos), usados también como sustantivos, equivalentes al término «castellano», que da nombre al propio idioma, sigue para la traducción del inglés también el criterio de adaptarse al máximo a los vocablos originales para favorecer la comunicación internacional, criterio que regirían asimismo los geólogos franceses e italianos, y ya en España catalanes. Del Río, en su obra de 1841, había empleado los términos Cambrio y Silurio.

En 1850, a los 56 años, acomete la tarea de elaborar un trabajo sintético de la Geología de España. Así, de 1850 a 1857, hasta dos años antes de su muerte, dará a luz los cinco pequeños volúmenes que, publicados por la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, componen su *Ensayo de una descripción general de la estruc-*

tura geológica del terreno de España en la Península, antecedente lejano de la monumental *Explicación del Mapa Geológico de España* que compondría medio siglo después Mallada, y primer trabajo sintético amplio de España al que seguiría la *Reseña geológica* de Luján, segundo presidente de la Comisión de la Carta Geológica, ingeniero de minas, militar y varias veces ministro de Fomento, publicado en el *Anuario Estadístico del Reino* en 1859. Su principal propósito, según él mismo dice, es *estimular a los geólogos a que llenen... vacíos, sintiéndose cumplidamente recompensado si pudiera servirles de alguna utilidad para apoyarse en él como punto de partida*. Cada grupo de terrenos estudiado viene acompañado del correspondiente mapa. Para su trazado, según él mismo dice, aparte de los datos que yo haya podido reunir en mis muchos viajes y excursiones, cuento además con las observaciones hechas y publicadas por varios geólogos extranjeros que han viajado por España, y cuento sobre todo con las numerosas descripciones parciales de diferentes individuos del

Sobre los terrenos terciarios de España,
por D. Joaquín Ezquerria.

A publico en el periódico de Madrid titulado El Español, núm. 615 y 622 del 9 y 16 de Julio de 1837.

En la época que los geólogos llaman secundaria, el suelo de nuestra península se hallaba cubierto por los mares, quedando sólo a descubierta ciertos picos de montañas que aparecían como otras tantas islas, formadas todas ellas de la que se llama un estr. chistoso. Para poder determinar la forma y extensión de este Archipiélago sería preciso recurrir a examinar detalladamente el terreno de nuestra península, conteniendo a estos descubrimientos por ahora tan pocos observaciones hechas con los conocimientos necesarios para poder resolver este problema de historia natural, cuyo interés sólo puede apreciar las personas que hayan llegado a tener cierta afición a las ciencias. En los pocos recorridos que he hecho hasta el día presente...

Figura 9.—Página manuscrita de Ezquerria *Sobre los terrenos terciarios de España*, trabajo publicado en dos números del periódico *El Español* de Madrid en 1837.

cuerpo de ingenieros de minas, algunas de las cuales han contribuido a formar el texto de nuestros cuatro tomos de "Anales de minas".

Una de las partes del «Ensayo», constituye el primer Catálogo de «Fósiles Orgánicos que hasta ahora se han encontrado y han sido clasificados en los diferentes terrenos de sedimento de la parte española de la Península». Este Catálogo incluye unas 400 especies y representa el estado de conocimientos entonces existente sobre la Paleontología de España. El segundo Catálogo sería elaborado por Mallada en 1892, y cuenta con 4.058 especies: en cuarenta años, el conocimiento de especies fósiles se multiplicó por diez.

Previamente a la terminación del *Ensayo*, Ezquerria publica en Stuttgart el primer *Mapa Geológico de España* (Geognostische Übersichtskarte von Spanien) en 1851 (el mapa lleva fecha de 1850). Se trata de una síntesis cartográfica acompañada de memoria, compuesta con el conjunto de trabajos cartográficos existentes, y es el equi-

valente, con los años de retraso correspondientes a la situación española, de los trazados en otros países europeos previamente a los mapas sistemáticos de los Servicios Geológicos y Mineros. En España será seguido por el mapa del ingeniero de minas-geólogo Amalio Maestre en 1863, síntesis en buena parte de trabajos de la Comisión de la Carta Geológica creada en 1849, el de los geólogos franceses Verneuil y Colomb de 1864 y el de Botella, ingeniero de minas-geólogo, de 1880; el primer Mapa sistemático de la Comisión, a escala 1:400.000, sería el mapa mural que puede verse en el Instituto Tecnológico Geominero de España, realizado en el período 1873-1889, tras la refundación de la Comisión de la Carta Geológica en la Primera República por Fernández de Castro, como Comisión del Mapa Geológico, reconfirmando la disposición de 1870 promovida por el ministro de Fomento Echeagaray, ingeniero de caminos y literato. La relevancia de este trabajo de Ezquerria, primera visión general de la geología del país que guiaría la labor posterior, difícilmente puede ser exagerada.

FÓSILES ORGÁNICOS

que hasta ahora se han encontrado y han sido clasificados en los diferentes terrenos de sedimento de la parte española de la Península.

Terrenos cuaternarios y terrenos terciarios de agua dulce.

CLASE.	ORDEN.	FAMILIA.	GÉNERO Y ESPECIE.	LOCALIDAD.	
Gasterópodos.	Pectinibranchios.	Nacticideos.....	<i>Neritina molinensis</i> . Ezq.....	Molina de Aragon.	
		Paludíneos.....	<i>Paludina impura</i> . Brard.....	Valladolid.	
			<i>Melanopsis buccinoides</i> . Lam....	Molina de Aragon.	
		Lymneos.....	<i>Lymnaea palustris</i> . Id.....	Valladolid: Tudela de Navarra.	
			<i>stagnalis</i> . Id.....	Fresdas, prov. de Burgos.	
			<i>longiscata</i> . Brongn.....	Id.	
			<i>Planorbis carinata</i> . Lam.....	Palencia; Tudela.	
			<i>corneus</i> Stud.....	Molina.	
			<i>Helix gualteriana</i> . Linn.....	Almería.	
			<i>carthuriana</i> . Lam.....	Tudela.	
Acéfalos.....	Ortoconquios...	Unionides.....	<i>Unio margaritifera</i> . Lam.....	Balsomero, prov. de Guadalupe.	
Mamíferos.....	Paquidermos.....	Proboscidienses...	<i>Mastodon angustidens</i> . Cuv.....	Valdehorras, prov. de Valladolid; Madrid.	
				<i>longirostris</i> . Kaup....	Cerro de S. Isidro, en Madrid.
				<i>giganteus</i> . Cuv.....	Id. y Teruel.

Figura 10.—Primer Catálogo de Fósiles españoles (fragmento), realizado por Ezquerria (1850-57), conteniendo unos cuatrocientos.

EL SIGNIFICADO CIENTIFICO Y TECNOLÓGICO DE EZQUERRA

Examinando con atención la obra conjunta de Ezquerria y su desarrollo, es difícil no pensar en un propósito común que da sentido a la misma, de los *Elementos de Laboreo* al primer *Mapa Geológico de España* y el *Ensayo de una descripción general de la estructura geológica del terreno de España en la Península*. Este propósito materializado en su obra, deriva de una lógica coherente: la necesidad mutua de Minería y Geología, de Técnica y Ciencia. Situado Ezquerria en medio del «furor minero» descrito por Mallada que sigue a la prospección del territorio español, obligada tras la independencia americana, piensa, y así lo dice, en la necesidad de tecnificar y ordenar el mismo. Consecuente con ello, escribe los *Elementos* en 1839, que de un lado ponen al alcance de la comunidad técnica la tecnología punta en laboreo de la época, y de otro dan criterios de prospección racionales. Después, en 1844, analiza y diagnostica el sector en *Datos y observaciones sobre la industria minera* y en 1852, las minas de Río Tinto.

Su trabajo minero le hace ver la necesidad de contar con un conocimiento geológico amplio del país que garantice una prospección minera racional, y pone manos a la obra produciendo en 1850 el primer Mapa Geológico de España y la primera síntesis geológica sistemática y global de 1850 a 1857, dedicando a esta tarea científica los últimos años de su vida.

Estas dos etapas de una laboriosa vida profesional en una época difícil, minera la primera y geológica la segunda, perfectamente encadenadas, dan cumplimiento a la tarea que probablemente se autoimpuso Ezquerria: colocar a España en el sector minero en un puesto de primera línea. Del éxito de esta dura labor, incardinada en la de varias generaciones de ingenieros de minas españoles, da cuenta el extraordinario desarrollo minero del país durante toda la segunda mitad del siglo XIX, que sitúa a España a la cabeza de Europa en la minería metálica.

En el recibidor inferior del Instituto Tecnológico Geominero de España, dos lápidas recuerdan a los ingenieros de minas-geólogos que contribuyeron al primer Mapa Geológico sistemático de España de 1889: la primera está encabezada por Ezquerria del Bayo, la segunda por Lucas Mallada. El encabezamiento no es casual; hay en efecto un paralelismo entre la labor de Mallada, arquitecto organizador del saber geológico de su tiempo en España, a fines del XIX, y la de Ezquerria, que cumple esa misma función en lo geológico, y además en lo minero, en torno a la mitad del siglo y en condiciones más difíciles. No debemos olvidar sin embargo que esa labor, al igual que la de Mallada, es en definitiva el fruto del trabajo de varias generaciones de ingenieros de minas-geólogos, de Casiano de Prado (que evoluciona también desde la mi-

nería a la geología e ingeniería geológica a partir de los 53 años) a Schultz, pasando por Maestre, Pellico, Naranjo, Luján o Amar de la Torre; y de cuatro instituciones, que son: la Dirección General de Minas (1825), el Cuerpo de Ingenieros de Minas (1833), las Escuelas de Minas de Almadén (1777) y Madrid (1836) y la Comisión de la Carta Geológica, hoy Instituto Tecnológico Geominero de España, la Institución Técnica más antigua del país y la segunda Científica, que desde hace más de ciento cincuenta años (1849) no ha dejado de prestar valiosos servicios a España como Servicio Geológico y Minero, aunador, como pioneramente lo hizo Ezquerria, de lo minero y lo geológico, de la Tecnología y la Ciencia, que sólo trabajando sinérgicamente superan la permanente tentación empirista de la Técnica y la academicista de la Ciencia.

AGRADECIMIENTOS

A los Doctores Ingenieros de Minas Historiadores Luis Adaro Ruiz-Falcó, Antonio Canseco Medel, Juan Manuel López de Azcona y Octavio Puche Riart, por su aportación de algunos textos e informaciones.

REFERENCIAS

ADARO RUIZ-FALCO, L. (1973): *Bibliografía Minera y Geológica Asturiana, con algunas noticias históricas sobre el Desarrollo Industrial de la Provincia*. Bibliófilos Asturianos, vol. IV (0), Lluarca (Asturias).

LOPEZ DE AZCONA, J. M. (1984): *Mineros destacados del siglo XIX: Joaquín Ezquerria del Bayo*. Industria Minera. Cons. Sup. de Col. de Ingen. de Minas. Madrid.

LOPEZ DE AZCONA, J. M., et al. (1992): *Minería Iberoamericana. Repertorio Bibliográfico y Biográfico*. 4 vol. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

MAFFEI, E., y RUA FIGUEROA, R. (1871/72): *Apuntes para una Biblioteca Española de Libros, Folletos y Artículos impresos y manuscritos, relativos al conocimiento y explotación de las riquezas minerales y a las ciencias auxiliares*. 2 vol. Imp. J. M. Lapuente. Madrid.

MALLADA, L. (1895): *Los progresos de la Geología en España en el siglo XIX*. Discurso de ingreso. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid.

PRADOS DE LA ESCOSURA, L. (1988): *De Imperio a Nación*. Alianza Editorial. Madrid.

PUCHE, O., y AYALA, F. J. (1993): *La «Orygthología» de Juan José Elhúyar y la «Oritognosia» de Andrés Manuel del Río, primeros tratados geológicos escritos por españoles, realizados en América*. Bol. Geol. y Min. ITGE. Madrid. En prensa.

Memoria sobre la organización, desarrollo y trabajos realizados en el XXXVIII Campamento para Prácticas de Geología «Pirineo Central 1992»

Por L. M. RIOS, J. M. CHARLET, J. M. GALERA, D. BARETTINO y F. BODEGA

INTRODUCCION

Desde el día 1 al 20 de julio de 1992 se celebró el XXXVIII Campamento para Prácticas de Geología «Pirineo Central 1992» organizado por el equipo del Grupo de Geología de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la Universidad Politécnica de Madrid, con el patrocinio de esta Escuela y la especial colaboración del Instituto Tecnológico Geominero de España.

Desde el Campamento de 1989, esta actividad voluntaria de larga tradición (J. M.^a RIOS GARCIA, 1955. *Memoria acerca de la organización y resultados logrados en el Primer Campamento para Prácticas de Geología. Pueyo de Jaca 1955*), ha evolucionado hasta devenir un cursillo itinerante en campo, en el que se muestran los ejemplos que ofrece el Pirineo Central en su vertiente sur; ejemplos de panorámicas y afloramientos de muy buena calidad. Por otra parte, se invita a los alumnos a realizar, mediante su labor personal, ciertos ejercicios de dificultad adecuada.

En la versión de este año se han utilizado cuatro bases sucesivas que han sido los pueblos de Hecho, Torla Bielsa y Castejón de Sos.

Las mismas personas que actuaron como instructores en el Campamento anterior lo han hecho en éste, sin olvidar a D. Julián Vega Esteban, que ejerció eficazmente su labor como secretario antes y durante el Campamento, y al conductor Fernando Llorente.

Como recuerdo de este Campamento hemos rodado un vídeo de 43 minutos de duración que intercala esquemas explicativos y parcelas de mapas geológicos junto con las tomas de campo así como algunas escenas de matiz social o de convivencia.

En algunos días de descanso o en otros de mal tiempo, que nos obligaron a cambiar el orden del programa previsto, además de las charlas y ejercicios en gabinete, proyectamos algunos vídeos relativos al Pirineo u otras áreas o temas de divulgación.

El montante de gastos de este Campamento (mencionado en epígrafe aparte), ha sido de 1.880.022 ptas., que repartido entre los 16 alumnos participantes resulta 117.501 pesetas por alumno, viniendo a ser el importe de la matrícula de este año (cuota de inscripción 46.000 ptas.) un 39 por 100 de dicha cantidad.

AGRADECIMIENTOS

Vaya nuestro más profundo agradecimiento a las personas, Organismos y Empresas colaboradoras. Sin su ayuda, éste y cada uno de los Campamentos no hubiera sido posible.

A la dirección de la Escuela por su apoyo y subvención.

Al Instituto Tecnológico Geominero de España por su subvención e importante ayuda en personal como en medios de locomoción.

A los naturales de cada comarca, por su cordialidad y acogedora simpatía.

DESARROLLO DEL CAMPAMENTO

Día 1. Recepción en Hecho (Huesca).

Día 2. Recorrido de la serie estratigráfica y estructuras del valle del río Aragón Subordán: Carbonífero, Permiano

de Aguas Tuertas, Calizas del Cretáceo y Paleoceno de la Boca del Infierno; Eoceno hasta San Pedro de Siresa, incluida la primera megacapa olitostromica de esta serie turbidítica.

Día 3. Recorrido de la cuenca molásica terciaria desde el Oligoceno de San Juan de la Peña, Peña Oroel, hasta los contrafuertes meridionales del flanco sur del macizo del Aspe en turbiditas equivalentes lateralmente a las del día anterior.

Día 4. Estancia en la base. Instrucciones. Entrenamiento sobre foto aérea. Tarde libre.

Día 5. La actividad prevista de cartografía sobre fotografías 1/30.000 desde un punto de panorámica sobre las Sierras de Visaurín y Bernera no se puede practicar por causa del mal tiempo. Espera en el refugio de Lizara para que escampe. Recorrido breve hacia la cabecera del valle de Aragüés del Puerto en Cretáceo-Paleoceno. Intenso frío. Pliegues en cascada de flanco inverso fallado.

Día 6. Levantamiento estructural del corte en el flysch eoceno al N de Aragüés del Puerto y su construcción gráfica por la tarde.

Día 7. Despedida de Hecho. Entrada al valle de Tena. Serie cretáceo-paleocena y morrenas en el puente que conduce al fuerte y ermita de Santa Elena. Vista desde las cercanías de Panticosa de los escarpes septentrionales de las Sierras en Cretáceo sobre los materiales devónicos de las partes bajas del valle. Llegada a Torla y vista de las relaciones tectónicas (Unidad de Monte Perdido sobre la Unidad de Gavarnie) en la entrada del valle de Ordesa.

Día 8. Ascenso desde el aparcamiento de Ordesa al mirador de Las Tres Proas. Ejemplo de acarreo de bloques. Descenso a Torla desde Las Cutas.

Día 9. Traslado al valle del Cinca por Boltaña y Ainsa. Panorámica desde Puértolas de los elementos de la Unidad de Gavarnie (Punta Llerga, Peña Solana, Peña Montañesa) sobre el Ilerdense de la Unidad de Boltaña Monte Perdido. Análisis de la esquistosidad en este Ilerdense. Análisis de miniestructuras de compresión en el Bunt de la base del manto de Gavarnie. Llegada a Bielsa.

Día 10. El mal tiempo lluvioso nos obliga a posponer hasta la tarde la visita al circo de La Larri: ventana tectónica donde se observa bien el autóctono del manto de Gavarnie. La mañana se emplea, dentro del hotel, en practicar sobre los fotogramas aéreos y en el visionado de algunos vídeos sobre geología.

Día 11. Descanso.

Día 12. Recorrido por la Unidad de Monte Perdido hasta la cabecera del cañón de Añisclo.

Día 13. Subida a La Estiva y visión panorámica de la cara norte del macizo de Monte Perdido (2.000 m. hasta el fondo del valle de Pineta) y línea de crestería frontera con Francia (Pico Blanco, Pico de La Canau, Pico Gabiedou, Las Blancas de La Larri), en un día excepcionalmente diáfano. Por la tarde, traslado a Castejón de Sos haciendo parada en el collado de Sahún.

Día 14. Recorrido por el río Noguera Ribagorzana, desde las facies de areniscas fluviales del Eoceno, las areniscas litorales de Arén, el Cretáceo margoso-turbidítico y luego calcáreo, y las dolomías del Jurásico medio-superior análogas a las productoras de gas en Francia. Por la tarde, charla sobre el ciclo alpino en el Pirineo e introducción a los rasgos estructurales del hercínico.

Día 15. Recorrido por el Devoniano del río Esera y hasta el Siluriano de la Sierra Negra. Visita a la excavación exterior de la antigua mina abandonada de Cerler. Por la tarde, charla sobre los sistemas Devoniano y Carbonífero.

Día 16. Descanso.

Día 17. Levantamiento estructural por la cuerda al N del collado de Gelada y, por la tarde, construcción del corte.

Día 18. Recorrido por el Devoniano del río Isábena. Interferencia de pliegues y control de las respectivas mini-estructuras. Por la tarde, exposición del profesor J. M. Charlet introductoria a la salida del día siguiente.

Día 19. Recorrido por las facies graníticas del macizo de La Maladeta y de su aureola metamórfica, entre la presa de Prado Nuevo y los lagos de Villibierna.

Día 20. Comida final de despedida.

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:

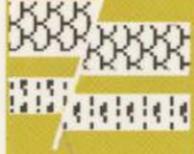
Leopoldo Aparicio Ladrón de Guevara
Instituto Tecnológico Geominero de España
Ríos Rosas, 23. 28003-Madrid

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

