

Caracterización y clasificación de los carbones cretácicos de Teruel. Relaciones entre sus características y el entorno geológico

R. JUAN *, C. RUIZ *, X. QUEROL **, J. L. FERNÁNDEZ ** y A. LÓPEZ **

** Instituto de Carboquímica, CSIC.
Pza. B. Paraíso. 50004 Zaragoza*

*** Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera", CSIC.
c/ Martí i Franquès, s/n. 08028 Barcelona*

RESUMEN

Se han caracterizado los carbones cretácicos de la cuenca minera de Teruel (España), mediante el estudio exhaustivo de 36 muestras de capa de todas las explotaciones con actividad minera. El estudio ha comprendido: Análisis inmediato, elemental y petrográfico. Asimismo, se han determinado otros parámetros cuyo conocimiento se consideró necesario. También se han realizado ensayos carboquímicos como oxidación e hidrogenación.

Los resultados muestran que aunque estos carbones pertenecen todos a una misma unidad geológica (Formación Escucha), existen diferencias claras entre los carbones de las subzonas Norte y Sur del Distrito Minero.

Estos carbones se han clasificado mediante sistemas científicos (Seyler, van Krevelen y Alpern-ICCP) y comerciales (ECE/UN y ASTM). El mejor parámetro clasificatorio ha sido la reflectividad de la vitrinita. Según el sistema de clasificación utilizado, los carbones de la subzona Norte se pueden considerar como lignitos o subbituminosos B y los de la subzona Sur como subbituminosos B ó A.

Las diferencias encontradas entre los carbones estudiados, se explican desde un punto de vista geológico, por dos motivos: 1) Diferente presión litostática sobre las capas de carbón según la subzona, debido al aumento progresivo de la potencia de los sedimentos del Cenomaniense - Senoniense (Cretácico

Superior) de Norte a Sur del Distrito Minero. 2) Menor influencia de la orogénesis alpina en las subzona Norte, contrastando con la subzona Sur, donde provocó gran número de fallas y plegamientos (una estructuración más intensa de las sucesiones mesozoicas).

Palabras clave: Carbón, caracterización, clasificación, Cretácico Superior, Cadena Ibérica.

ABSTRACT

Cretaceous coals from the Teruel Mining District (Spain) have been characterized by an exhaustive study of 36 bed samples from all of the underground and open cut mines with activity in that coal field. This study has included proximate, elemental, petrographic and other analyses. Also, some chemical tests, as oxidations and hydrogenations, have been carried out.

The results show that although these coals belong to the same geological unit (Escucha Formation in the lower Cretaceous), there are clear differences between the Northern and Southern Subzones of the Mining District.

These coals have been classified by some scientific (Syler's, van Krevelen diagram and Alpern-ICCP) and commercial (ECE/UN and ASTM) systems. The best parameter to classify these coals has been the vitrinite reflectance. In depending on the used classification system, coals from the North Subzone can be considered as lignites or subbituminous B while coals from the South Subzone can be considered as subbituminous B or A.

The differences between both groups of studied coals can be explained, from a geological viewpoint, by two major factors: 1) The lithostatic pressure supported by the coal beds has been different in depending on the Subzone, because of the progressive thickness increase of the Cenomanian - Senonian sediments (Upper Cretaceous) from the North to the South of the Mining District. 2) The intensity of the Alpine Orogeny was stronger in the South Subzone; where gave rise to a more intense structuration of the Mesozoic sequences.

Key-Words: Coal, characterization, classification, Upper Cretaceous, Iberian Range, NE Spain.

INTRODUCCIÓN

Para poder utilizar de la forma más correcta un producto, es necesario conocerlo en profundidad y, tratándose de una materia tan compleja y heterogé-

nea como el carbón, toda aportación que contribuya a esclarecer sus características analíticas, estructurales y de comportamiento químico, resulta de gran interés.

En esta línea, la caracterización del carbón, en su más amplio sentido, resulta siempre útil y su mantenimiento actualizado, necesario dadas las posibles variaciones del carbón dentro de una misma cuenca minera.

Asimismo, tanto desde el punto de vista industrial como desde el científico, es deseable agrupar los carbones según características comunes. Esto es, en esencia, lo que se consigue con los distintos sistemas de clasificación de carbones.

La caracterización de los carbones de Teruel como un conjunto, se abordó por primera vez, por Osacar (1987), en un trabajo realizado por el Instituto de Carboquímica (CSIC) para ENDESA, partiendo de muestras de producción minera, si bien, no se clasificaron ya que en aquel momento no se contaba con los parámetros necesarios para hacerlo.

El presente trabajo presenta dos diferencias fundamentales respecto al anterior. 1) El tipo de muestras: Se ha trabajado con muestras de capa que, si bien representan peor en muchos casos la producción de una explotación, individualizan mejor las características de cada carbón, a la vez que resultan de más utilidad desde el punto de vista científico (principalmente geológico y geoquímico), y 2) Es más ambicioso en cuanto al número de parámetros estudiados, técnicas analíticas aplicadas para su estudio y ensayos especiales realizados con las muestras de carbón.

CONTEXTO GEOLÓGICO

La actividad minera del Distrito Minero Turolense, se centra esencialmente en la explotación de capas de carbón y arcillas cretácicas, y se sitúa en las áreas oriental y suroriental de la provincia de Teruel.

Geológicamente se sitúa en la Zona de Enlace entre la Rama Oriental de la Cordillera Ibérica y el extremo suroccidental de las Cordilleras Costeras Catalanas (Guimerá 1984). Dentro del Distrito minero se distinguen dos áreas claramente diferenciadas y separadas por la alineación estructural de Portalrubio-Casteldecabra-Molinos-Castellote: a) Subzona Norte, compuesta por las áreas mineras de Ariño-Andorra, Estercuel y Foz Calanda, y b) Subzona Sur, compuesta por las áreas mineras de Utrillas, Portalrubio, Galve y Castellote. Esta diferenciación se basa en dos hechos esenciales: 1) La Subzona Sur presenta importantes espesores de materiales del Cretácico supe-

rior (centenas de metros) entre la Formación Escucha ó la Formación Utrillas y los sedimentos terciarios. En el sector de Ariño-Andorra y Foz Calanda, los materiales del Cretácico superior presentan potencias muy reducidas (< 25m.), o incluso nulas. 2) Las áreas de Utrillas, Portalrubio, Galve y Castellote presentan una deformación Alpina bastante intensa, mientras que las áreas de Estercuel, Andorra-Ariño y Foz Calanda muestran una deformación estructural mucho menor.

La unidad estratigráfica que contiene las capas de carbón explotadas es la Formación Escucha (Albiense Medio), unidad definida inicialmente por Aguilar et al. (1971) y redefinida, dividida en miembros, por Cervera et al. (1976) y Pardo (1979) y modelizada por Querol (1990).

La Formación Escucha constituye el registro de la sedimentación en un delta-estuario cuya evolución se refleja en la existencia de tres sucesiones sedimentarias (de progradación, retrogradación y progradación deltaica respectivamente), de las que solamente las dos superiores presentan niveles de carbón.

La Formación Escucha presenta un registro sedimentario compartimentado en seis cubetas, separadas por umbrales de sedimentación: 1) Cubeta de Utrillas, en la que existen dos áreas de interés minero: áreas de Utrillas-Escucha y de Portalrubio, 2) Cubeta de Castellote, 3) Cubeta de Calanda, 4) Cubeta de Oliete, en la que se distinguen dos áreas mineras: áreas del Valle de Ariño y de Estercuel, 5) Traiguera y 6) Santa Bárbara. Sólo las cuatro primeras cubetas presentan niveles carbonosos en explotación que constituyen el Distrito Minero de Teruel.

El muestreo realizado en el presente trabajo cubre todo el Distrito Minero Turolense, englobando capas de las dos Subzonas y se ha realizado de forma que queden representadas capas de carbón de todos los subambientes de depósito diferenciado sedimentológica y geoquímicamente por Querol (1990) y Querol (1991). Así se ha muestreado las capas de carbón de facies de llanura deltaica fluvial (Valle de Ariño, Estercuel y zonas superiores de Portalrubio, Utrillas y Foz Calanda) y las de facies del cinturón de marismas (capas inferiores de Utrillas, Castellote, e inferiores e intermedias de Portalrubio y Foz Calanda).

MATERIAL Y MÉTODOS

METODOLOGÍA DE MUESTREO

Las muestras estudiadas, 36 en total, fueron tomadas de todas las explotaciones de la provincia de Teruel con actividad minera en los años 1987-1988,

sin exclusión y se han agrupado, atendiendo a un criterio geológico, en dos subzonas: Norte y Sur. La subzona Norte (SN) comprendería las áreas de Ariño-Andorra, Estercuel, y Foz Calanda. La subzona Sur (SS) abarcaría las áreas de Escucha, Portalrubio y Castellote.

El método que consideramos idóneo para tomar muestras de capa de carbón (la roza de techo a muro de la capa de carbón y perpendicular al plano de sedimentación), es el sugerido en la norma ASTM D388-84, concretamente el método del U.S. Bureau of Mines, basado en el trabajo de J.A. Holmes (1911).

Este sistema de trabajo no se ha podido utilizar en algunos casos, bien por la naturaleza de la capa de carbón (elevada potencia y/o pronunciado buzamiento), bien por la naturaleza de la explotación (en minería de interior capas de más de unos 2,5 m de potencia no están al descubierto en su totalidad). De ahí que, en aquellos casos que no se ha podido utilizar el procedimiento de la roza vertical, haya sido necesario realizar la toma de muestra mediante otros procedimientos, como rozas inclinadas y perforaciones con barrena.

Las muestras de carbón se guardaron en recipientes herméticos y bajo argón hasta el momento de su preparación para análisis.

MÉTODOS ANALÍTICOS

La preparación de las muestras tomadas y sus análisis se han realizado siempre, salvo muy concretas determinaciones instrumentales, bajo las normas internacionales más utilizadas a nivel mundial (ISO en todos los casos que ha sido posible y ASTM en los restantes). Ocasionalmente ha sido necesario modificar dichas normas en aras de mejorar su aplicabilidad al caso concreto de los carbones turolenses.

El estudio de la materia mineral asociada al carbón, requirió en primer lugar, efectuar el aislamiento de la misma, mediante destrucción del componente orgánico del carbón por ataque con peróxido de hidrógeno en caliente. Este procedimiento, solubiliza alguno de los minerales presentes, como carbonatos, sulfatos y piritita, por lo que su contenido se ha calculado a partir de los parámetros analíticos correspondientes.

Las materias minerales aisladas se estudiaron mediante difracción de rayos X (DRX) determinándose semi-cuantitativamente su contenido en cuarzo y minerales de arcilla.

El método de aislamiento utilizado es largo y tedioso en su realización, por lo que el ataque se realizó sobre una selección representativa de las muestras considerando áreas, capas y contenidos de materia mineral. Posteriormente, se

llevó a cabo un estudio estadístico que relacionó los valores obtenidos de materia mineral con parámetros analíticos de determinación rutinaria (cenizas, azufre pirítico, azufre de sulfatos, azufre retenido en cenizas y CO_2 de carbonatos). Las ecuaciones obtenidas permitieron calcular el contenido teórico en materia mineral para todas las muestras, sin errores significativos. Este contenido teórico se utiliza como parámetro en las bases de cálculo en que interviene la materia mineral.

Asimismo, se han realizado algunos ensayos carboquímicos sencillos y no normalizados, de oxidación e hidrogenación, en instalaciones a escala laboratorio.

RESULTADOS

ESTUDIO ANALÍTICO

Los resultados del estudio analítico, agrupados por subzonas, se expresan en las tablas 1, 2 y 3. Se indican los intervalos de variación y los valores medios encontrados, lo que permite apreciar, cuando existe, la diversidad de valores para un parámetro y la diferenciación entre las dos subzonas.

a) *Análisis inmediato y elemental*

En la tabla 1, se muestran los resultados del análisis inmediato y elemental junto con los de otros parámetros estudiados.

Los resultados obtenidos muestran un mayor *porcentaje de cenizas* de los carbones de la SN, lo que indica un mayor aporte terrígeno en estos carbones. Esta distribución es coherente con el modelo sedimentario de la Formación Escucha, ya que las turberas precursoras de las capas carbonosas de la SN se emplazaban en áreas más proximales del aparato deltaico que las de la SS, y por tanto con mayor influencia detrítica. Las continuas inundaciones a que estaban sometidas las turberas de áreas proximales, se traduce en carbones con una fracción mineral predominantemente constituida por minerales arcillosos, mientras que en turberas más distales, el contenido mineral total es menor y la proporción de materia mineral diagenética (sulfuros de hierro) es más alta.

Por lo que respecta al *carbón fijo*, la diferencia de valores entre las dos subzonas sugiere un mayor grado de carbonificación de los carbones de la SS.

La *capacidad de retención de humedad* (CRH) es la humedad que alcanza un carbón en equilibrio con una atmósfera del 96-97% de humedad relativa, a

TABLA 1

ANÁLISIS INMEDIATO	SUBZONA NORTE		SUBZONA SUR	
	<i>Parámetros</i>	<i>Intervalos</i>	<i>Media</i>	<i>Intervalos</i>
% Humedad(ea)	8-20	12	8-17	11
% Cenizas(ea)	12-53	27	6-29	18
% Volátiles(ea)	20-34	28	26-35	30
% Carbono fijo(ea)	17-42	33	37-50	41
ANÁLISIS COMPLEMENTARIO				
% HCRH(ea)	18-24	19	12-19	15
PCS(Kcal/Kg)(ssc)	5175-7029	6390	6978-7592	7302
Índice Hardgrove(ea)	57-106	83	43-66	56
ANÁLISIS ELEMENTAL				
% Azufre total(ea)	4-8	6	2-7	4
% Azufre pirítico(ea)	1-5	3	1-4	2
% Azufre sulfatos(ea)	0,4-1,4	0,7	0,1-0,4	0,2
% Carbono(ssc)	55-72	65	72-79	76
% Hidrógeno(ssc)	4-7	5	5	5
% Nitrógeno(ssc)	0,2-0,8	0,6	0,6-0,9	0,7
% Azufre orgánico(ssc)	2-6	4	1-4	2
% Oxígeno ¹ (ssc)	19-36	25	13-20	16
% Cloro(ssc)	0,01-0,05	0,03	0,01-0,04	0,03
Flúor(ppm)(ea)	46-346	135	18-203	77

Análisis inmediato y elemental

CRH: Capacidad de retención de humedad

PCS: Potencia calorífica superior

ea: Carbón estabilizado al aire

ssc: Carbón seco y sin cenizas

¹: Calculado por diferencia

TABLE 1

Proximate and ultimate analysis

CRH: Moisture holding capacity

PCS: Calorific value

ea: Air dried basis

ssc: Dry, ash free basis

¹: Calculated by difference.

TABLA 2

Parámetros	SUBZONA NORTE		SUBZONA SUR	
	Intervalos	Media	Intervalos	Media
% SiO ₂	22-54	38	24-56	41
% Al ₂ O ₃	15-34	25	8-32	20
% Fe ₂ O ₃	11-40	22	10-26	21
% CaO	1-13	5,8	1-17	5,4
% MgO	0,2-3,0	1,1	1-3	1,2
% Na ₂ O	0,1-2,0	0,8	0,3-3,0	1,3
% K ₂ O	0,3-3,0	1,4	1-2	1,4
% TiO ₂	0,1-3,0	1,3	0,4-2,0	1,2
% P ₂ O ₅	0,1-0,8	0,3	0,1-0,8	0,3
% SO ₃	1-14	5,7	0,2-21,0	5,2
T. ^º fusión ¹ (°C)	1285->1500	1388 ²	1240->1500	1343 ²

Estudio de las cenizas

¹: Temperatura de semiesfera

²: Promediando las muestras con T.^º fusión > 1500°C

TABLE 2

Study of the ashes

¹: Hemisphere temperature

²: Hemisphere temperatures > 1500°C considered as 1500°C

30°C. En algunos carbones, se corresponde con la humedad que presenta el carbón en la capa, por lo que se aplica fundamentalmente en las bases de cálculo con fines clasificatorios. Asimismo presenta una correlación inversa con el grado de carbonificación de los carbones, ya que los carbones más evolucionados por su mayor compactación y menor porosidad tienen una capacidad de retención de agua menor. Los valores inferiores de la SS, indicarían, como ya se ha citado anteriormente, un mayor grado de carbonificación de dichos carbones.

En cuanto a la *potencia calorífica*, se puede observar que los carbones de la SS presentan valores superiores respecto a los de la SN, lo que coincide con las diferencias halladas para los otros parámetros.

El *índice Hardgrove* es un parámetro indicador de la molturabilidad del

TABLA 3

ANÁLISIS MINERALÓGICO	SUBZONA NORTE		SUBZONA SUR	
	<i>Parámetros</i>	<i>Intervalos</i>	<i>Media</i>	<i>Intervalos</i>
% Caolinita(mm)	29-59	47	29-77	48
% Illinita(mm)	0-15	9	0-24	11
% Pirita(mm)	8-35	20	10-40	24
% Cuarzo(mm)	2-8	6	3-12	9
ANÁLISIS PETROGRÁFICO				
% Vitrinita	63-89	75	62-84	73
% Exinita	0-5	1	0-3	2
% Inertinita	10-36	24	15-38	25
Reflectividad vitrinita	0,3-0,4	0,3	0,4-0,5	0,4

Análisis mineralógico y petrológico

mm: materia mineral

TABLE 3

Mineralogical and petrological analysis

mm: mineral matter basis

carbón, utilizado para conocer su resistencia a la molienda previa a su combustión, en las centrales térmicas. Los valores encontrados de este parámetro permiten apreciar la mayor dureza de los carbones de la SS, hecho relacionado lógicamente con su mayor grado de compactación.

La presencia de *azufre* en los carbones, es causa de contaminación ambiental y de deterioro de los equipos industriales en los procesos de combustión, por lo que dicho parámetro ha de ser considerado en la caracterización de carbones cuya principal aplicación es su utilización como combustibles. Los carbones de la SN presentan un mayor contenido en azufre total, debido probablemente a aportes de sulfatos procedentes de la lixiviación de materiales liásicos y triásicos y a la acumulación sincrónica con éstos de los restos vegetales que dieron lugar al carbón del Distrito Minero de Teruel como proponen Querol (1990) y Querol et al. (1991). Asimismo se observa en conjunto que el contenido de las tres formas de azufre es superior en la SN.

Los resultados del *análisis elemental* de estos carbones también ponen de

manifiesto diferencias claras en los contenidos en carbono y oxígeno de las dos subzonas. El mayor contenido en carbono y el menor contenido en oxígeno que presentan los carbones de la SS, indican, una vez más, que estos han alcanzado un mayor grado de evolución en el proceso de carbonificación.

b) *Análisis de cenizas*

En la tabla 2 se muestra el estudio analítico de las cenizas de los carbones de Teruel.

Al observar los resultados se aprecia que la relación Si/Al es mayor en la SS, lo que indica un mayor carácter silíceo de las cenizas de estos carbones. Por otro lado, el contenido más bajo de Al_2O_3 y mayor contenido en Na_2O en la SS, podría contribuir a que los valores de temperatura de fusión de sus cenizas sean inferiores a los de la SN, como se puede observar en la tabla 2. El contenido en SO_3 retenido en las cenizas de la SN es ligeramente superior, lo que estaría relacionado con el mayor contenido en calcio que presentan dichas cenizas, ya que este elemento fija el SO_3 en forma de $CaSO_4$.

c) *Análisis mineralógico y petrológico*

El supuesto de considerar al carbón como una roca orgánica, lleva consigo el estudio de sus dos componentes: inorgánico (minerales) y orgánico (macerales).

En este trabajo, como ya se ha citado anteriormente, se ha realizado un análisis semicuantitativo, por DRX, de cuarzo y minerales de arcilla, completado con los contenidos en piritita y calcita deducidos, respectivamente, del análisis de azufre piritítico y del contenido en CO_2 . En cuanto al componente orgánico del carbón, se llevó a cabo un estudio petrográfico, según la norma ISO-7404, para determinar la composición de grupos de macerales y la reflectividad media de la vitrinita.

En la tabla 3, se muestran los datos analíticos del componente mineral, referidos a 100 g de materia mineral de carbón, apreciándose el mayor contenido en cuarzo que presentan las muestras de la SS, lo que se corresponde con el mayor contenido en SiO_2 que presentaban sus cenizas.

Si en el estudio petrográfico del componente orgánico, se considera la reflectividad media de la vitrinita (aunque tratándose de carbones de bajo rango sería más correcto desde el punto de vista petrológico hablar de huminita que de vitrinita de la que es precursora), parámetro que varía de forma directa con el rango del carbón, se comprueba que los carbones de la SN presentan valo-

res inferiores a los de la SS, lo que se corresponde con lo indicado a lo largo del estudio analítico sobre el mayor grado de carbonificación de los carbones de la SS.

Ya que los parámetros analíticos estudiados anteriormente nos han permitido distinguir claramente entre subzonas, y considerando que la reflectividad de la vitrinita es un valor independiente del contenido en materia mineral, se consideró interesante tratar de diferenciar globalmente los carbones de las distintas áreas, mediante este parámetro.

Así, si se estudia la distribución de las distintas clases de reflectividades de la vitrinita, se pueden apreciar claras diferencias entre áreas.

La secuencia de reflectividades encontrada fue: Foz Calanda < Esteruel < Andorra-Ariño < Castellote < Escucha < Portalrubio (figs. 1 y 2).

Este estudio petrográfico permitió incluso apreciar diferencias de rango entre las capas de una misma área, como es el caso de las capas O/L y P/R de Andorra-Ariño y de las 1.^a/2.^a y 4.^a/6.^a en Escucha (figs. 1 y 2).

ENSAYOS CARBOQUÍMICOS

Los ensayos carboquímicos realizados, se encaminaron a estudiar el comportamiento de estos carbones en dos procesos diferentes de la combustión: La oxidación de carbones para producir ácidos húmicos (AH) susceptibles de ser utilizados como fertilizantes y mejoradores de suelos, y la hidrogenación de carbones encaminada a la producción de combustibles líquidos a partir de esta materia prima.

La oxidación de carbones se llevó a cabo calentándolos en corriente de aire a 170 y 150°C. A esta última temperatura de trabajo se podía observar (tabla 4) diferencias entre los comportamientos de los carbones de las dos subzonas, lo que no era factible a 170°C, ya que a esta temperatura, la producción de ácidos húmicos era elevada pero análoga en ambas. Dichas diferencias apuntarían a una mayor reactividad en este proceso de los carbones de la SN.

Este comportamiento está correlacionado con el menor grado de evolución que presentan estos carbones en comparación con los de la SS, ya que la estructura de su matriz carbonosa será menos condensada y por lo tanto más susceptible de reaccionar con el oxígeno del aire, que se emplea como agente oxidante.

Los ensayos de hidrogenación realizados en reactores a escala de laboratorio dieron porcentajes de conversión en líquidos, discretos (67-70%) y no diferenciadores entre las dos subzonas.

La homogeneidad de los resultados se explica si se considera por una par-

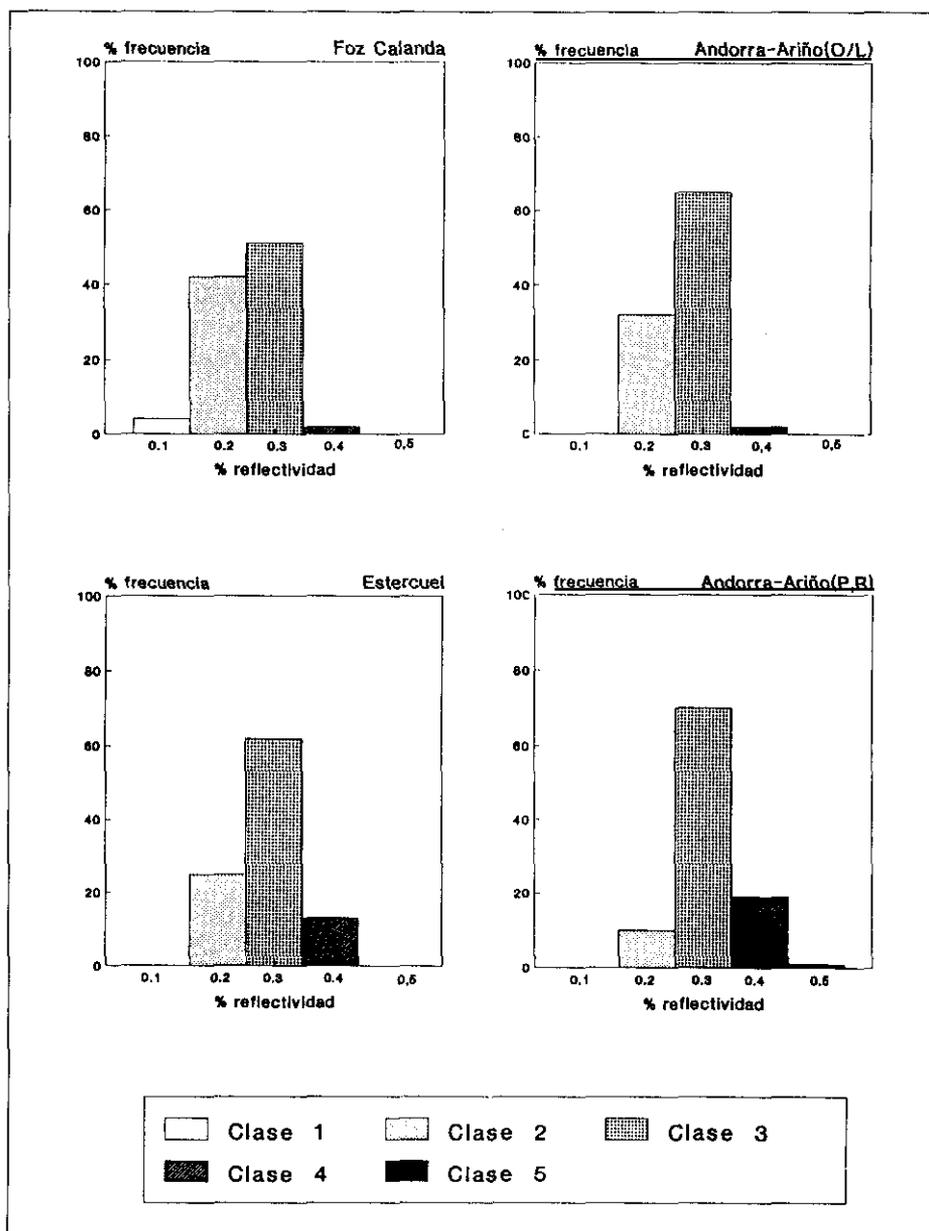


Fig. 1.—Distribuciones de las clases de reflectividades de la vitrina, para los carbones y algunas capas de las áreas mineras de la subzona Norte.

Fig. 1.—Class distributions of vitrinite reflectances, for the coals and some beds from the mining areas in the North Subzone.

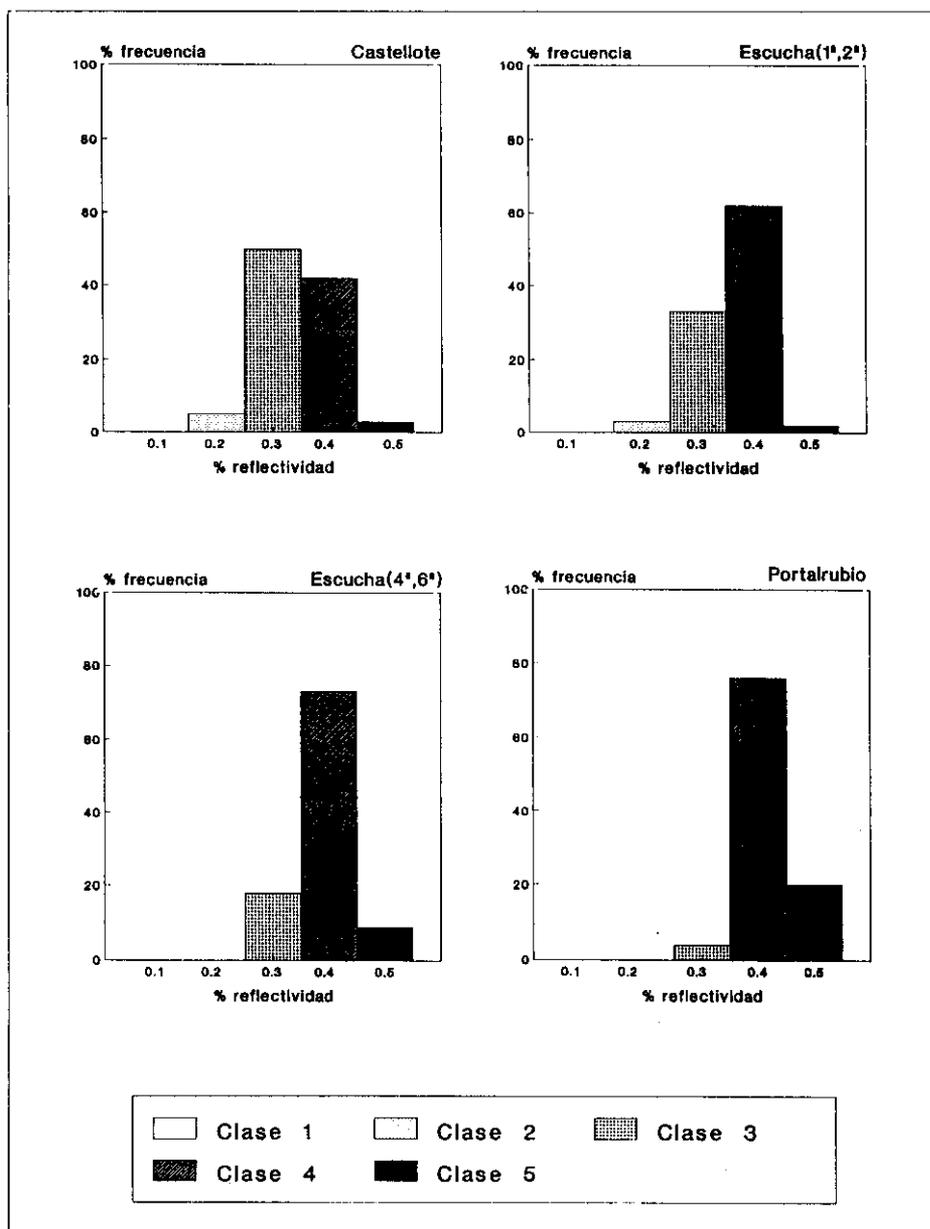


Fig. 2.—Distribuciones de las clases de reflectividades de la vitrina, para los carbones y algunas capas de las áreas mineras de la subzona Sur.

Fig. 2.—Class distributions of vitrinite reflectances, for the coals and some beds from the mining areas in the South Subzone.

TABLA 4

	SUBZONA NORTE	SUBZONA SUR
<i>Ensayo carboquímico</i>	<i>Valor medio</i> ¹	<i>Valor medio</i> ¹
% Producción de ácidos húmicos (Oxidación):		
150°C	44	22
170°C	65	60
% Conversión en líquidos (Hidrogenación)	67	71

Ensayos carboquímicos

¹: Resultados sobre carbón seco y sin cenizas.

TABLE 4

Coal chemicals production

¹: Dry, ash free basis.

te, la conocida correlación existente entre contenidos en vitrinita y porcentajes de conversión en la licuefacción y por otra, la uniformidad de contenidos en vitrinita que muestran las dos subzonas.

CLASIFICACIÓN DE LOS CARBONES

SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

En general, se puede hablar de dos tipos de sistemas de clasificación según sean los fines concretos, comerciales o científicos, a que vayan destinados. Dos de los sistemas clasificatorios comerciales más conocidos son: El establecido por la Comunidad Económica Europea (ECE/UN-1988) y el propuesto por la norma ASTM D-388. 1984. El primero de ellos distingue entre carbones de bajo y rango más alto, en función de la potencia calorífica calculada (considerando el carbón húmedo (CRH) y libre de cenizas), y de la reflectividad media de la vitrinita. Fija el límite entre los dos grupos citados, en una potencia calorífica de 24 MJ/Kg, para carbones que como los de Teruel tienen una $Re < 0,6$. Por lo que respecta al sistema de clasificación ASTM, y para carbones con características como las de los carbones de Teruel, el parámetro

a utilizar es la potencia calorífica calculada sobre el carbón húmedo (CRH) y libre de materia mineral. Comparándolo con el sistema de clasificación anterior, tiene la ventaja de que permite establecer más grupos, diferenciando así mejor entre carbones de rangos parecidos, como los turolenses.

En cuanto a los sistemas científicos de clasificación, los más antiguos utilizan el análisis elemental mientras que los modernos se basan en los parámetros petrográficos, ya que son los más directamente relacionados con el rango o grado de carbonificación del carbón. De estos sistemas se pueden citar la clasificación de Seyler (Francis, 1961) basada en los contenidos de carbono e hidrógeno sobre carbón seco y libre de materia mineral, la de Alpern-ICCP (Alpern, Lemos de Sousa y Flores, 1988) basada en el poder calorífico sobre carbón húmedo (CRH) y sin cenizas y en la reflectividad de la vitrinita, y la petrográfica aplicada por Stach et al. (1982), basada en la reflectividad de la vitrinita.

Ya que los sistemas clasificatorios ni contemplan los mismos parámetros ni idénticas bases de cálculo, y presentan diversos enfoques, un mismo carbón podrá estar clasificado de forma distinta según el sistema elegido.

En el presente trabajo, se han aplicado a los carbones de Teruel diversos sistemas clasificatorios. Pero debido a la influencia de la materia mineral en algunos parámetros de clasificación, de todos los carbones estudiados, solamente se han utilizado con fines clasificatorios, aquellas muestras con un contenido en cenizas inferior al 30%.

RESULTADOS

A continuación, se exponen las clasificaciones realizadas:

a) **Clasificación ECE/UN-1988:** Según este sistema, todos los carbones de la SN serían de bajo rango y todos los de la SS de medio rango.

b) **Clasificación ASTM D-388-84:** De acuerdo con los valores límites citados por la norma ASTM, los carbones de Teruel se agruparían tal como se muestra en la fig. 3. En ella, se puede apreciar que los carbones de la SN estarían constituidos por los carbones subbituminosos menos evolucionados (C y B), mientras que los de la SS pertenecerían a los subbituminosos más evolucionados (A) e incluso, algunos entrarían en el rango de los bituminosos.

Asimismo, al aplicar este sistema clasificatorio por cubetas, se puede apreciar una secuencia en los rangos de sus carbones (fig. 4) que coincide con la secuencia obtenida al estudiar las clase de reflectividad de la vitrinita de los carbones.

c) **Clasificación de Seyler:** Los carbones de la SN son inclasificables,

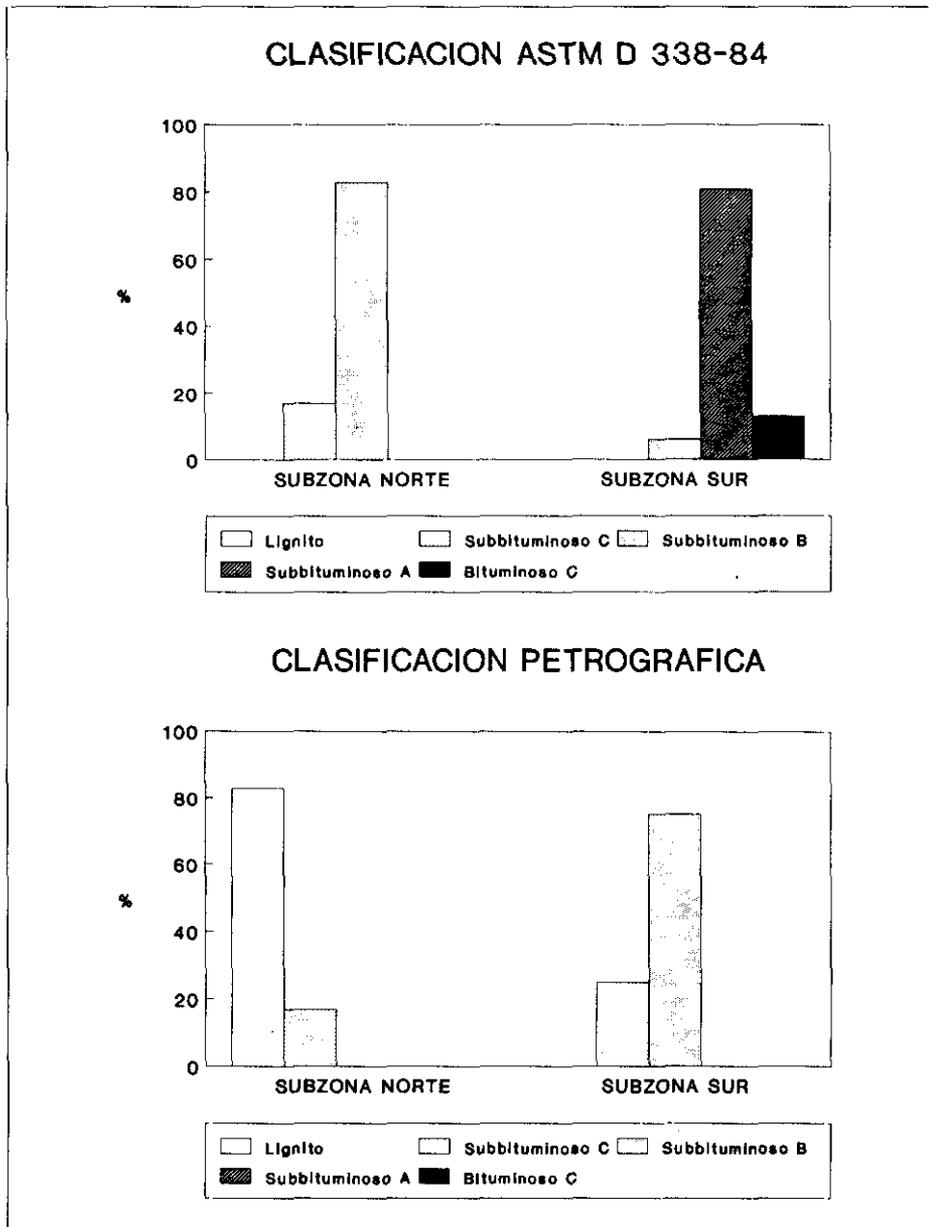


Fig. 3.—Clasificación de los carbones de las dos subzonas según los sistemas de clasificación ASTM y petrográfico.

Fig. 3.—Classification of the coals from the two Subzones after ASTM and petrographic classification systems.

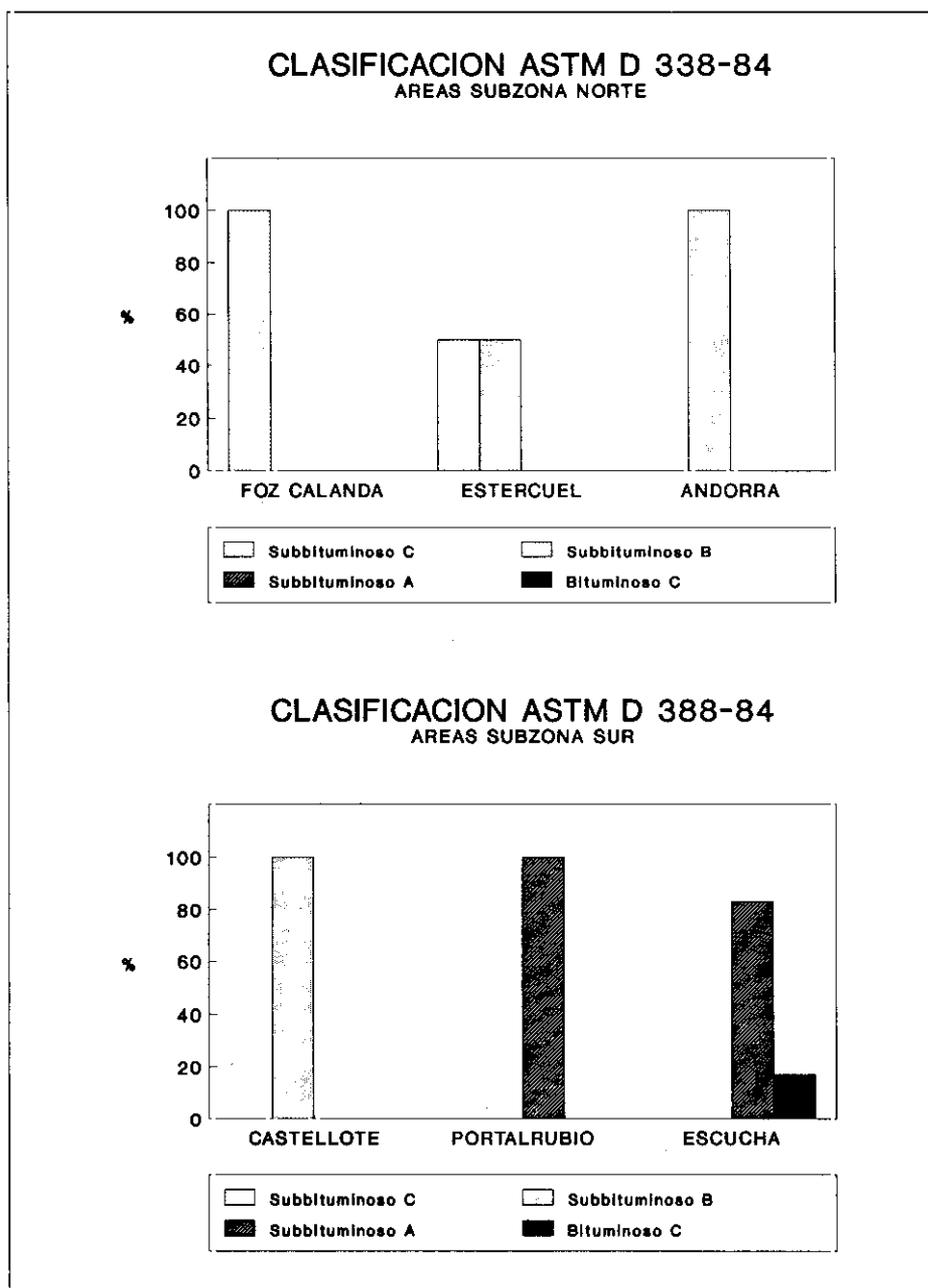


Fig. 4.—Clasificación ASTM de los carbones de cada una de las áreas mineras.
Fig. 4.—ASTM classification of the coals from each one of the mining areas.

dado que su contenido en carbono, no llega al límite inferior ($C = 75\%$) de dicha clasificación. Los carbones de la SS son, salvo dos excepciones, clasificables con el rango de ortolignitos.

Basándose también en el análisis elemental, concretamente en las relaciones atómicas H/C y O/C del diagrama de van Krevelen (1961), Hagemann (1989) asume un diagrama de variación del rango durante las etapas de carbonificación, en el que los carbones de la SN entrarían en su mayor parte como subbituminosos y alguno de ellos como lignitos, mientras que los de la SS se distribuirían entre subbituminosos y bituminosos altos en volátiles (fig. 5).

d) **Clasificación de Alpern - ICCP:** Aplicando este sistema de clasifi-

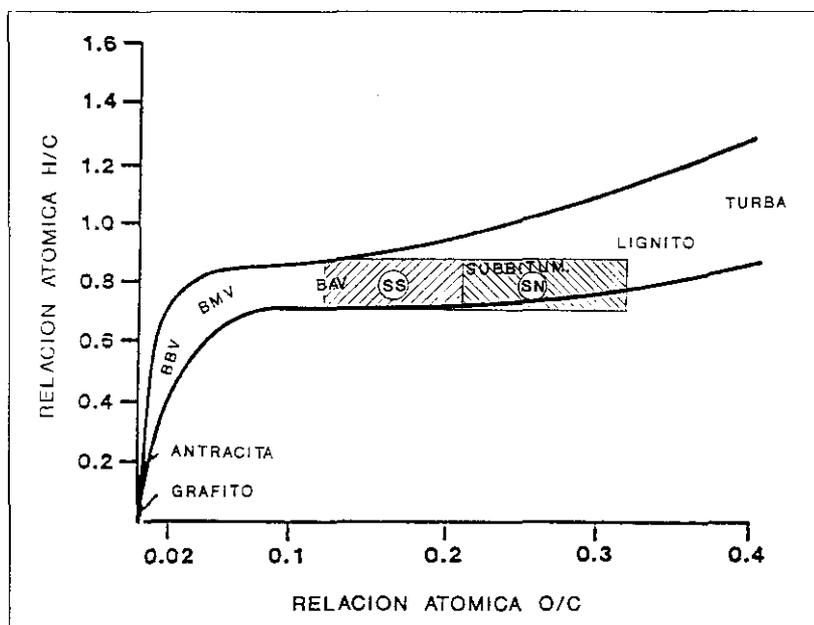


Fig. 5.—Situación de los carbones de las dos subzonas en el diagrama H/C - O/C de van Krevelen.

Fig. 5.—Position of the coals from the two Subzones in the H/C - O/C van Krevelen diagram.

cación, los carbones de la SN resultan todos, metalignitos siendo inclasificables los de la SS al no encajar simultáneamente en los límites de los dos parámetros clasificatorios (poder calorífico y reflectividad de la vitrinita).

e) **Clasificación petrográfica:** Según los tratados petrográficos (Stach et al. 1982), considerando la reflectividad media de la vitrinita y utilizando la terminología del sistema ASTM, los carbones de Teruel se agruparían tal como se observa en la fig. 3.

Se comprueba que con este sistema clasificatorio los rangos resultantes son inferiores, en todos los casos, a los obtenidos por la norma ASTM, si bien, siguiendo la misma secuencia.

En la SN, predominarían los lignitos mientras que en la SS los más abundantes serían los subbituminosos B.

Análogamente a como se ha procedido en la clasificación ASTM, se ha aplicado este sistema clasificatorio por cubetas (fig. 6), observándose, lógicamente, la misma secuencia ya detectada al estudiar la reflectividad de la vitrinita de los carbones.

Al aplicar conjuntamente los diferentes sistemas de clasificación, se observa una clara diferencia de rangos entre las dos subzonas, correspondiendo los rangos más altos a la SS como se ha citado reiteradamente en el estudio de los parámetros de clasificación.

A modo de resumen, en la fig. 7 se muestra la aplicabilidad de los parámetros generalmente utilizados para la clasificación de carbones por rangos y la situación de los carbones de Teruel en la secuencia de rangos de la norma ASTM.

Dicha tabla visualiza lo ya indicado a lo largo del trabajo respecto a las diferencias entre las dos subzonas y a su diferente situación en el sistema de clasificación, según el parámetro utilizado.

Se observa asimismo, una amplia superposición de los valores de las materias volátiles de las dos subzonas, por lo que este parámetro no parece adecuado para clasificar los carbones de Teruel, lo cual coincide con el criterio de la norma ASTM, sobre la aplicabilidad de las materias volátiles como parámetro de clasificación.

DISCUSIÓN: CAUSAS DE LAS DIFERENCIAS DE RANGO

Teniendo en cuenta que todas las capas de carbón estudiadas pertenecen a la misma unidad geológica (Formación Escucha), las diferencias observadas en cuanto a los rangos de los carbones de las SN y SS han de tener su origen en diferencias de los factores que regularon la carbonificación de una y otra subzona.

Si se superponen los valores de reflectividad, o los rangos obtenidos según

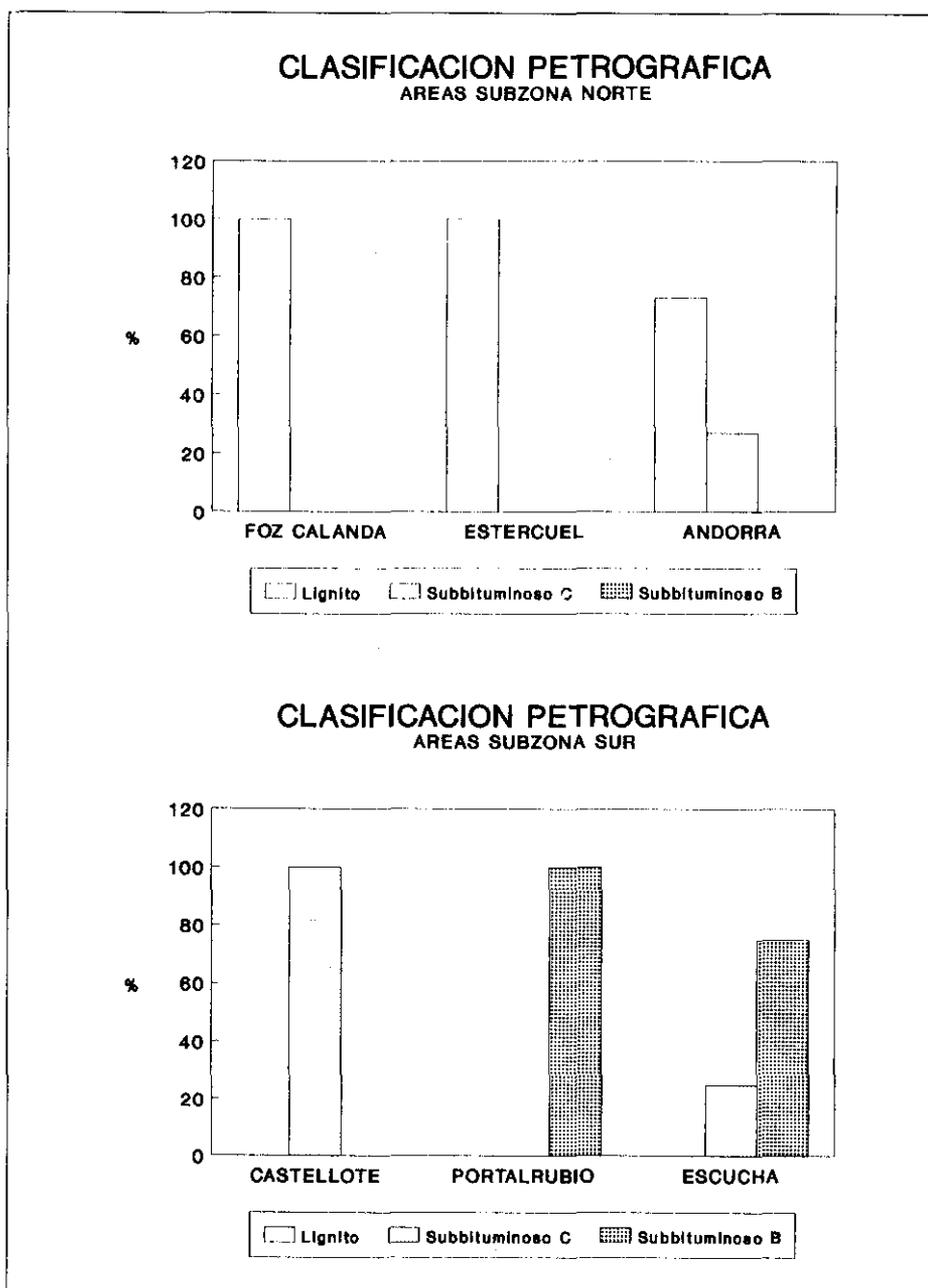


Fig. 6.—Clasificación petrográfica de los carbones de cada una de las áreas mineras.

Fig. 6.—Petrographic classification of the coals from each one of the mining areas.

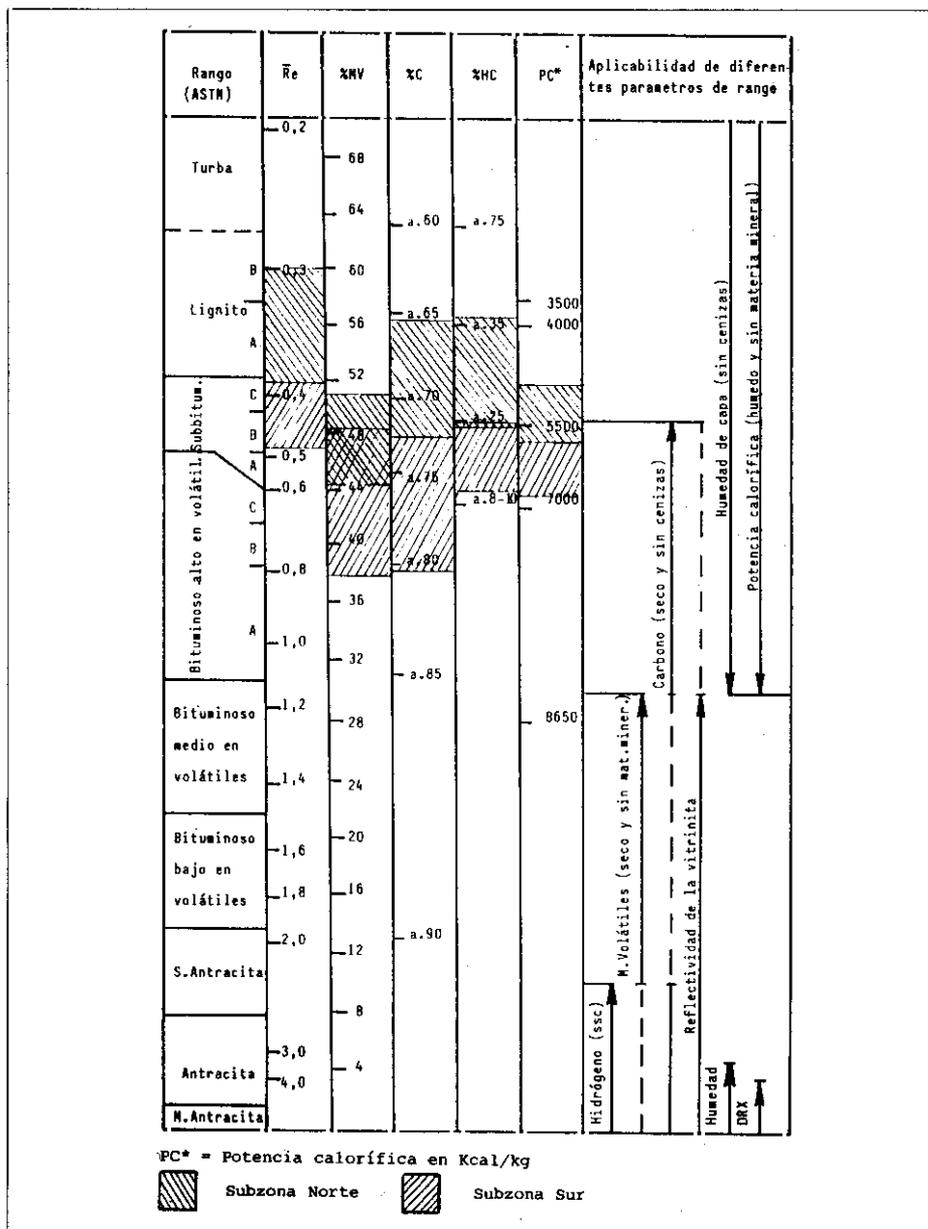


Fig. 7.—Intervalos para los diferentes parámetros de rango de los carbones de las dos subzonas, de acuerdo con los sistemas de clasificación ASTM y petrográfico.

Fig. 7.—Ranges for the different rank parameters of the coals from the two subzones according to the ASTM and petrographic classification systems.

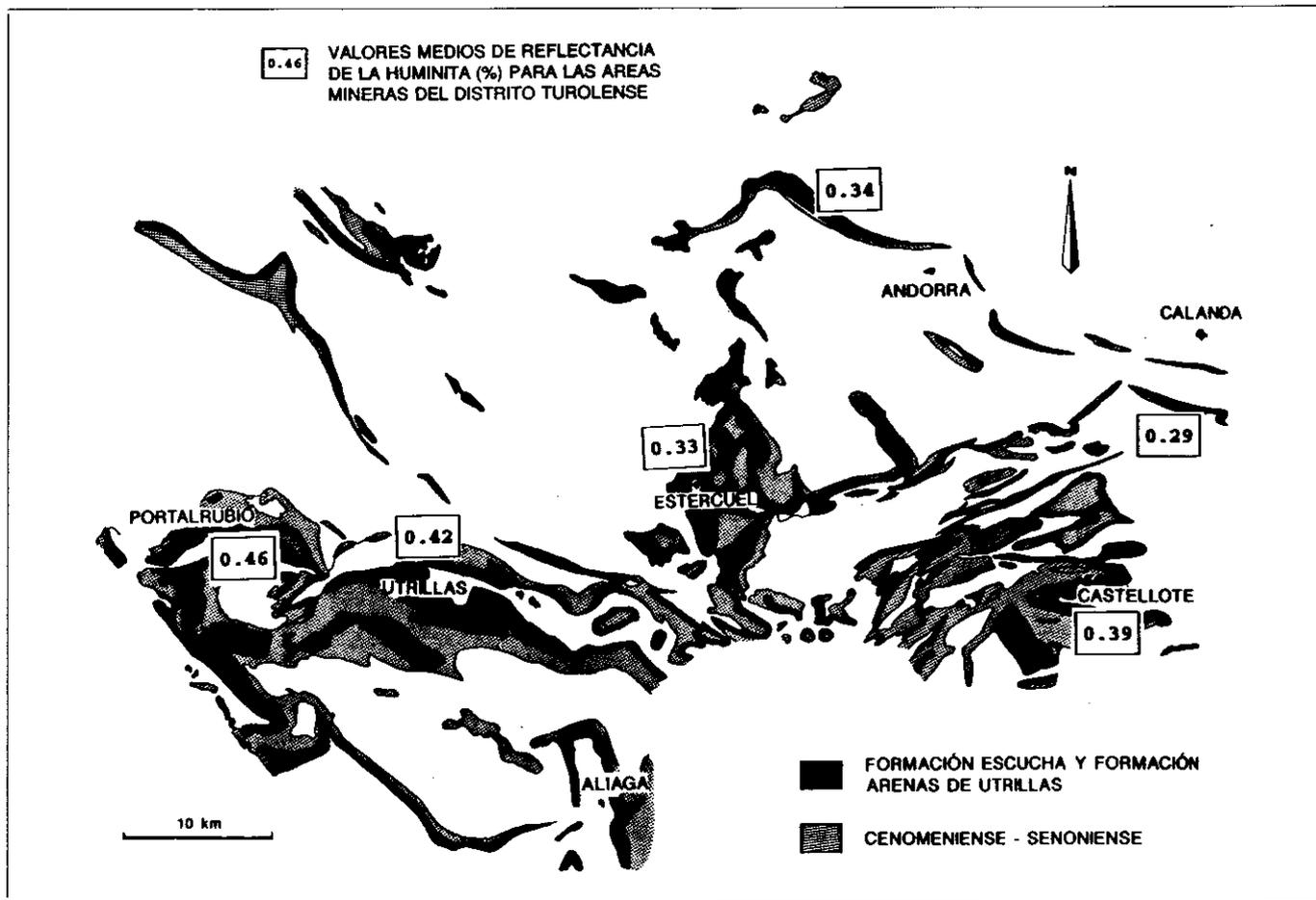
los diversos sistemas de clasificación utilizados, sobre un mapa geológico del área en estudio (fig. 8), destaca una clara correlación con dos hechos concretos, que conjuntamente podrían explicar la diferencia de rango observada entre los carbones de las SN y SS, tales hechos son:

1) El progresivo incremento en reflectividad de la vitrinita de los carbones de los sectores de Utrillas, Portalrubio, Galve y Castellote, respecto a las de Ariño - Andorra, Estercuel y Foz Calanda, es paralelo al incremento (progresivo) de la potencia de los materiales del Cretácico superior entre la Formación Escucha ó la Formación Utrillas y los sedimentos terciarios. En el sector de Ariño - Andorra y Foz Calanda, los materiales del Cretácico superior presentan potencias muy reducidas (< 25 m.), ó incluso nulas. Desde el sector de Estercuel y en dirección a Escucha, Portalrubio y Castellote, los materiales del Cretácico superior llegan a presentar hasta 500 m. de potencia, reposando sobre éstos una potente serie terciaria. Esta diferencia de potencias de las facies del Cretácico superior entre las SN y SS, se traduce en una diferencia de profundidad de enterramiento de las capas carbonosas, y por lo tanto en un incremento de la temperatura, que podría ser suficiente para explicar la diferencia de maduración o de rangos, apuntada anteriormente. Cabe resaltar que diferencias de profundidad de enterramiento del orden de 100 a 250 m. son suficientes para provocar una mayor reflectividad de la vitrinita en las capas basales de la Formación Escucha en Utrillas - Escucha y Andorra - Ariño (0,43 y 0,36 % Re) respectivamente, respecto a las capas superiores de los mismos sectores (0,40 y 0,31 respectivamente).

2) Las áreas de Utrillas, Portalrubio, Galve y Castellote, que como se ha señalado anteriormente muestran mayores reflectividades de la vitrinita, coin-

Fig. 8.—Mapa geológico del distrito minero de Teruel (basado en MARTIN LEYVA, 1984) en el que se refleja la distribución de los afloramientos de las Facies Utrillas (Fm. Arenas de Utrillas y Fm. Escucha) y de los materiales carbonatados y margosos del intervalo Cenomaniense - Senoniense; conjuntamente con los valores medios de reflectancia de la huminita para cada sector del distrito minero. Nótese que los valores más altos de reflectancia se corresponden con áreas en las que los materiales del Cretácico superior presentan un mayor desarrollo. Estos sectores además coinciden con áreas de plegamiento alpino más intenso.

Fig. 8.—Geological map of the Teruel Mining District (after MARTIN & LEYVA, 1984, modified) showing the outcros distribution of the Utrillas Facies (Utrillas Sands Fm. and Escucha Fm.) and of the Cenomanian - Senonian (Late Cretaceous) limestones and marls; coupled with the mean values of huminite reflectance for each mining area in the Teruel District. Note that the highest values of huminite reflectance are located in the areas where the Upper Cretaceous materials are thickest. At the same time, these areas are those where the Alpine folding are more intense.



ciden con dos sectores de la Cordillera Ibérica con intensa fracturación y plegamientos alpinos: a) El sector Portalrrubio-Ejulve (dirección de Enlace, W-E) y b) el sector de Ejulve-Alcorisa (dirección Catalana, SW-NE). Los sectores de Estercuel, Andorra - Ariño y Foz Calanda, se emplazan en unos sectores con una deformación estructural mucho menor. Esta diferencia de deformación estructural, y por tanto de un incremento de presión y/o gradiente geotérmico, podría ser otra de las causas de la diferenciación de rangos entre las capas de carbón de la SN y SS.

A este respecto, Berkowitz y Schein (1952) demostraron que cuando un carbón inmaduro (en el rango de lignito) es sometido a presiones tangenciales asociadas a procesos de plegamiento, se produce una reducción de la humedad que puede ayudar a acelerar la maduración. Trinkle y Hower (1984) demuestran que las diferencias de reflectividad en varios sectores de la capa Elkhonr n.º 3 (carbón bituminoso alto en volátiles del Pensilvaniense medio del E Kentucky, USA) se deben a esfuerzos tectónicos diferenciales post- y sin-deposicionales. Levine y Davis (1984) y Middleton (1990), entre otros, apoyan la teoría de que existe una repercusión directa de la tectónica sobre la carbonificación.

En definitiva, cabe suponer que la superposición los dos efectos geológicos citados, la presión litostática y los efectos de la orogénesis alpina, originaron las diferencias de rango observadas entre los carbones cretácicos de la subzonas Norte y Sur de Teruel.

CONCLUSIONES

1) El emplazamiento geográfico de las turberas precursoras del carbón de las diferentes áreas mineras, más o menos proximales en los dispositivos deltaicos en los que se sedimentó la Formación Escucha, originó algunas diferencias, en términos generales, entre los carbones de las subzonas Norte y Sur de Teruel. Los parámetros más afectados por este hecho son:

– Contenido en cenizas: Los carbones de la subzona Norte presentan mayores contribuciones terrígenas.

– Contenido en azufre: Los carbones de la subzona Norte presentan contenidos más altos de las tres formas de azufre: pírítico, de sulfatos y orgánico.

– Composición de las cenizas: Los carbones de la subzona Sur presentan cenizas con menor contenido en aluminio y mayor carácter sódico que las de la subzona Norte, lo que hace que la fusibilidad de sus cenizas sea algo mayor.

2) Las diferencias encontradas entre los valores de los parámetros relacionados con el rango de los carbones de las subzonas Norte y los de la Sur, indican que dichos carbones presentan grados de carbonificación distintos.

Los parámetros diferenciadores más claramente relacionados con el rango permiten señalar en cada caso:

– Carbono fijo: Indica una matriz carbonosa más condensada en los carbones de la subzona Sur.

– CRH e índice de Hardgrove: Sugieren que el volumen total de microporos es menor, por mayor compactación y deformación sufridas por los carbones de la subzona Sur.

– Potencia calorífica: Los carbones de la subzona Sur presentan los valores mayores.

– Relación atómica C/O: Implica la existencia de estructuras más ricas en carbono y pobres en oxígeno en los carbones de la subzona Sur.

– Reflectividad de la vitrinita: Está directamente relacionada con el rango. Los carbones de subzona Sur presentan los valores más altos.

– Reactividad química (oxidación): La estructura hidrocarbonada menos condensada y el grado de porosidad de los carbones de la subzona Norte, hacen que éstos sean más reactivos frente al oxígeno que los carbones de la subzona Sur.

3) Los diferentes sistemas de clasificación utilizados muestran claramente diferencias entre los carbones de las dos subzonas:

– Clasificación ASTM: La mayor parte de los carbones de la subzona Norte podrían clasificarse como subbituminosos B, mientras que los de la subzona Sur se considerarían como subbituminosos A, de mayor grado de carbonificación.

– Clasificación petrográfica: La mayor parte de los carbones de la subzona Norte están incluidos en el rango de los lignitos, mientras que los de la subzona Sur se consideran subbituminosos.

4) Las diferencias encontradas en el grado de carbonificación de los carbones cretácicos de las dos subzonas de Teruel podrían ser debidas a la combinación de dos efectos geológicos.

– Incremento progresivo de Norte a Sur de la potencia de los materiales del Cretácico superior, entre la Formación Escucha y los sedimentos del Terciario, con el consiguiente aumento de la presión litostática.

– La orogénesis alpina, cuya intensidad se dejó sentir más en la subzona Sur, con abundantes fracturaciones y plegamientos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. R. Moliner su ayuda en la toma de muestras, al Dr. J. L. Miranda su colaboración en los estudios de hidrogenación y al Dr. J. M. Andrés su asesoramiento en los tratamientos estadísticos e informáticos.

El proyecto de investigación: "Caracterización de carbones aragoneses" del que forma parte este proyecto, fue realizado en el Instituto de Carboquímica, gracias a la financiación del CSIC, OCICARBON y Diputación General de Aragón - Diputación Provincial de Teruel (Juan, 1990).

BIBLIOGRAFÍA

- AGUILAR, M. J., RAMIREZ del POZO, J. y RIBA, O. (1971). Algunas precisiones sobre la sedimentación y paleoecología del Cretácico inferior en la Zona de Utrillas - Villarroya de los Pinares (Teruel). *Est. Geol.* 27, 497-512.
- ALPERN, B., LEMOS de SOUSA, M. J. y FLORES, D. (1988). A progress report on the Alpern-ICCP classification. *Doc. N 1449 de ISO/TC 27.*
- BERKOWITZ, N. y SCHEIN, G. (1952). Some aspects of the ultrafine structures of lignites. *Fuel*, 31, 19-32.
- CERVERA, A., PARDO, G. y VILLENA, J. (1976). Algunas precisiones litoestratigráficas sobre la formación de lignitos de Escucha. *Tecniterrae*, 14, 25-33.
- ECONOMIC COMMISSION for EUROPE. UNITED NATIONS. (1988). "International codification system for medium and high rank coals". *Doc. ECE/COAL/115.* New York.
- FRANCIS, W. (1961), "Coal". 2ª ed. Edward Arnold Publishers Ltd. London.
- GUIMERÁ, J. (1984). Paleogene evolution of deformation in the NE Iberian Peninsula. *Geol. Mag.*, 121, 413-420.
- HAGEMANN, H. W. (1989). "Introduction to lignite petrology and its industrial applications". Short course notes. Dpto. Geología Dinámica. Universidad de Barcelona.
- HOLMES, J. A. (1911). The sampling of coal in the mine. *U. S. Bureau of Mines Technical paper N 1.*
- JUAN, R. (1990). "Caracterización de carbones aragoneses". Informe final del proyecto Instituto de Carboquímica. Zaragoza.
- LEVINE, J. R. y DAVIS, A. (1984). Optical anisotropy of coals as indicator of tectonic deformation, Broad Top coal field, Pennsylvania. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, 100-108.
- MIDDLETON, M. F. (1990). Tectonic influence on vitrinite reflectance. *Int. Jour. Coal Geology*, 16, 235-237.

- OSACAR (1987). "Caracterización de carbones aragoneses". Informe final del proyecto. Instituto de Carboquímica (CSIC). Zaragoza.
- PARDO, G. (1979). Estratigrafía y sedimentología de las formaciones detríticas del Cretácico inferior terminal en el Bajo Aragón turolense. Tesis Doctoral. Univ. Zaragoza.
- QUEROL, X. (1990). Distribución de materia mineral y azufre en los carbones de la Formación Escucha. Relación con los factores geológicos, sedimentológicos y diagenéticos. Tesis Doctoral. Univ. Barcelona.
- QUEROL, X. et al. (1991). Distribution of sulfur in coals of the Teruel Mining District, Spain. *Int. Jour. Coal Geology*, 18, 327-346.
- STACH, E. et al. "Coal Petrology". (1982). (3^{ed}). Gebrüder Borntraeger. Berlín, Stuttgart.
- TRINKLE, E. J. y HOWER, J. C. (1984). Petrography of the middle Pennsylvanian Upper Elkhorn n.º 3 coal of eastern Kentucky, U.S.A. *Spec. Publs. Int. Ass. Sediment.*, 7, 349-360. VAN KREVELLEN, D. W. "Coal". (1961). Elsevier Publishing Co. Amsterdam.

Manuscrito recibido: 16 diciembre 1991.

Revisión aceptada: 5 mayo 1993.