

CARACTERISTICAS GEOQUIMICAS, Y PETROGRAFICAS DE LOS PRINCIPALES YACIMIENTOS CARBONIFEROS VENEZOLANOS

MARCOS ELIGIO ESCOBAR NAVARRO y MANUEL MARTINEZ SANTANA

Marcos Eligio Escobar Navarro, Licenciado en Química, UCV, 1977. Doctor en Geoquímica, UCV, 1987. Profesor en el Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias UCV, 1977-1990. Coordinador de la Oficina de Análisis del ICT, 1988-1990. Gerente de la División de Investigación y Desarrollo, INZIT-CICASI, 1990-presente. Miembro del Comité de Postgrado en Química, LUZ, 1991-presente. 44 presentaciones en congresos, 12 publicaciones en revistas nacionales. Área de trabajo: Geoquímica orgánica, Geoquímica del petróleo, Geoquímica del carbón. Dirección: Gerencia de Investigación y Desarrollo, INZIT-CICASI, Km 15, Vía La Cañada, Maracaibo.

Manuel Martínez Santana, Licenciado en Química, UCV, 1984. Doctorado en Geoquímica (en progreso), UCV. Profesor investigador por oposición, en el Instituto de Ciencias de la Tierra, UCV, 1985-presente. Jefe del Laboratorio de Rayos X, 1988-1990. Jefe de la Sección de Pregrado del Centro de Enseñanza Especializada, 1990-presente. Actualmente se desempeña como profesor agregado. 23 presentaciones en congresos, 8 publicaciones en revistas nacionales. Área de trabajo: Geoquímica orgánica, Geoquímica del carbón. Dirección: Centro de Geoquímica, Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela. Apartado 3895, Caracas, 1010 A.

RESUMEN

Trece muestras representativas de yacimientos y manifestaciones carboníferas en distintos puntos de Venezuela fueron preparadas para los siguientes análisis: ensayos inmediatos, poder calórico, petrografía orgánica, tenor de azufre y sus formas (pirítico, sulfático y orgánico) y análisis químico de los componentes mayoritarios de las cenizas, utilizando las normas ASTM para la mayor parte de los mismos. Los valores de materia volátil y poder calórico altos y los de cenizas bajos, favorecen el uso de los carbones nacionales para fines energéticos. Sin embargo, los valores de azufre son relativamente altos, lo cual requiere en general un lavado previo del mineral. A partir del análisis normativo en las cenizas del carbón, de las relaciones geoquímicas interelementales y de parámetros petrográficos, se pueden establecer diferencias importantes en las condiciones fisicoquímicas de acumulación de la turba, y en las posibles fuentes sedimentarias. Así, los carbones sedimentados durante el Paleoceno (formaciones Los Cuervos y Marcelina) se formaron en ambientes más silíceos y posiblemente con mayores fluctuaciones en el nivel freático de las turberas, que los carbones más jóvenes (pos-Paleoceno) tanto en la Cuenca del Lago de Maracaibo, como en la de Falcón y la Oriental. Los carbones de la Cuenca Oriental de Venezuela son muy semejantes entre sí, aún cuando presentan variaciones en el rango. Se caracterizan en general por altos tenores de azufre y predominancia de la vitrinita sobre los restantes macerales. Sus ambientes sedimentarios fueron muy similares (planicies deltaicas bajas) en márgenes tectónicamente activos. Los carbones procedentes del Estado Falcón presentan características geoquímicas y petrográficas similares a los de la Cuenca Oriental. Las similitudes entre éstos y los carbones falconianos consisten básicamente en: medios sedimentarios análogos (llanuras deltaicas), tipos de materia orgánica primigenia (fundamentalmente terrestre) y condiciones de acumulación similares (levemente reductoras, alta concentración de sulfuros). Las únicas manifestaciones carboníferas en Guayana, los carbones del Cerro Impacto, no guardan semejanzas con los restantes. Existen marcadas diferencias en el tipo de materia orgánica parental, en las condiciones paleoclimáticas de sedimentación y en la fuente de clásticos, que ameritan un estudio particular de los mismos. / PALABRAS CLAVE / Carbón / Venezuela / Geoquímica / Petrografía /

Los carbones de la Cuenca Oriental de Venezuela son muy semejantes entre sí, aún cuando presentan variaciones en madurez. Se caracterizan en general por altos tenores de azufre y predominancia de la vitrinita sobre los restantes macerales. Sus ambientes sedimentarios fueron muy similares (planicies deltaicas bajas) en márgenes tectónicamente activos.

Los carbones procedentes del Estado Falcón presentan características geoquímicas y petrográficas similares a los de la Cuenca Oriental. Las similitudes entre éstos y los carbones falconianos consisten básicamente en: Medios sedimentarios análogos (llanuras deltaicas), tipos de materia orgánica primigenia (fundamentalmente terrestre) y condiciones de acumulación similares (levemente reductoras, alta concentración de sulfuros).

Las únicas manifestaciones carboníferas en Guayana, los carbones del Cerro Impacto, no guardan semejanzas con los restantes. Existen marcadas diferencias en el tipo de materia orgánica parental, en las condiciones paleoclimáticas de sedimentación y en la fuente de elásticos, que ameritan un estudio particular.

El carbón ha constituido hasta hace pocos años un recurso de poco interés en Venezuela, aún cuando sus reservas no son despreciables. Esta situación se mantuvo durante muchos años debido en gran parte al notable auge petrolero, que obligó al país a dirigir la mayor parte de sus recursos hacia la exploración y explotación del mismo, junto al hierro y el aluminio.

A raíz de la disminución de las reservas petroleras, y en particular del petróleo liviano, fácil de extraer, y de la perentoria necesidad de divisas, comenzó a partir de la década de los 80 un interés, tanto estatal como de la empresa privada, por la exploración y explotación de los numerosos yacimientos carboníferos en Venezuela. Sin embargo, la actividad carbonífera nacional no se ha acompañado de un desarrollo paralelo de actividades de investigación orientadas a caracterizar y proponer una explotación más armónica y eficiente de esta roca.

El estudio de las características geológicas y geoquímicas de los carbones aporta información valiosa sobre aspectos tan importantes como origen de los yacimientos, grado evolutivo alcanzado, variaciones espaciales, relaciones entre diferentes mantos, presencia y cuantificación de azufre y otros componentes potencialmente tóxicos y contaminantes, correlación de capas en un yacimiento y entre yacimientos asociados, y predicción de la continuidad de los mantos, entre otros.

La literatura química sobre los carbones venezolanos se inicia con Scoanes (1967), en un importante estudio sobre las características químicas de algunos extractos obtenidos a partir de los carbones de Lobatera, Estado Táchira. Kapo y López (1971) reconocen que los carbones venezolanos presentan algunas características petrográficas y geológicas que no son acordes con el grado evolutivo alcanzado, y por tanto son considerados "anómalos" por los autores, al compararlos con los carbones europeos, norteamericanos y australianos.

Entre los trabajos sobre características geoquímicas de los carbones venezolanos destacan los estudios sobre distribución de elementos minoritarios y trazas en carbones de Fila Maestra (Martínez y López, 1988, 1989), la determinación de la afinidad orgánica que manifiesta el calcio por la fracción orgánica de los carbones subbituminosos presentes en el Frente de Montañas de Guárico (Martínez y Mora, 1991) y un estudio preliminar sobre seis carbones venezolanos (Martínez et al., 1989). El presente estudio busca ampliar la caracterización de los distintos carbones venezolanos, basándose en información geoquímica y petrográfica. De esta manera se pretende contribuir al mejor conocimiento de los mismos, a fin de hacer un mejor uso de este valioso recurso natural no renovable. Con tal propósito se presentarán datos promedio, calculados a partir de numerosos ensayos realizados en el INZIT-CICASI, en un total de trece (13) muestras procedentes de los depósitos (Figura 1) de Guasare, Aricuaisá (Estado Zulia), Santo Domingo, Las Adjuntas, Lobatera, Hato de la Virgen y San Pedro del Río (Estado Táchira), Santa Teresa (Estado Mérida), Pedregal (Estado Falcón), Naricual, Fila Maestra (Estado Anzoátegui), Taguay (Estado Aragua) y Cerro

Impacto (Estado Bolívar)

Parte Experimental

La recolección de muestras y los ensayos fisicoquímicos y petrográficos se realizaron según las normas de la American Society for Testing Materials (ASTM, 1989). Cada muestra seleccionada fue sometida a un proceso de homogeneización y cuarteo para obtener una submuestra representativa, destinada a ser preparada a las diferentes granulometrías requeridas en los ensayos de caracterización.

Los análisis petrográficos permiten conocer el grado de evolución del carbón mediante la medición de la reflectancia promedio de la vitrinita, según la norma ASTM D-2748-79, en un microscopio petrográfico LEITZORTHOPLAN POL. La determinación de los componentes macerales se realizó utilizando la norma del International Committee of Coal Petrology (ICCP), la cual permite reconocer los constituyentes microscópicos del carbón.

Los análisis químicos comprenden los análisis inmediatos, azufre y sus formas, poder calórico y análisis químico de las cenizas. Estos ensayos permiten reconocer el rango del carbón. Los análisis inmediatos comprenden la determinación de los porcentajes de humedad (ASTM D-3173-82), materia volátil (D-3175-82), cenizas (D-3174-82) y carbono fijo (por diferencia al 100%, de los tres anteriores). El azufre total se determina en un equipo Preiser, modelo RSA, acorde con la norma D-3177-84, y las formas de azufre (sulfático, pirítico, orgánico) por la norma ASTM D-2492-84. El poder calórico se mide según la norma D-2015-85 en un calorímetro Parr, y el análisis químico de cenizas, según los procedimientos D-3682-78 y D-3683-78.

TABLA I LOCALIDAD Y ASIGNACION ESTRATIGRAFICA DE LOS CARBONES ANALIZADOS

<i>Muestra</i>	<i>Localidad</i>	<i>Formación</i>	<i>Edad</i>
Fila Maestra	Fila Maestra, Edo. Anzoátegui	Marcelina	Mioceno
Naricual	Minas Naricual, Edo. Anzoátegui	Naricual	Oligoceno
Guasare	Minas Paso Diablo, Edo. Zulia	Quebradón	Paleoceno
Aricuaisá	Aricuaisá, Edo. Zulia	Carbonera	Eoceno
Santo Domingo	Qda. La Carbona, Edo. Táchira	Carbonera	Eoceno
Las Adjuntas	Las Adjuntas, Edo. Táchira	Los Cuervos	Paleoceno
Impacto	Cerro Impacto, Edo. Bolívar	?	Mioceno
Hato la Virgen	Hato de la Virgen, Edo. Táchira	Carbonera	Eoceno
Santa Teresa	La Palmita, Edo. Mérida	Carbonera	Eoceno
San Pedro	San Pedro del Río, Edo. Táchira	Los Cuervos	Paleoceno
Lobatera	Minas de Lobatera, Edo. Táchira	Carbonera	Eoceno
Pedregal	Minas de Agua Clara, Edo. Falcón.	Cerro Pelado	Mioceno
Taguay	Minas de Taguay, Edo. Aragua	Chaguaramas	Mioceno



Figura 1. Localización de las muestras estudiadas en el presente trabajo.

TABLA II ANALISIS INMEDIATOS, PODER CALORICO Y CLASIFICACION DE LOS CARBONES ESTUDIADOS, SEGUN LA ASTM

Muestra	Humedad \pm 0,3%	Materia Volátil \pm 0,5%*	Carbono Fijo \pm 0,5%*	Cenizas \pm 0,5%*	Poder ** Calórico \pm 50 BTU/lb	Clasificación Según la ASTM (D 388- 1977)
Fila Maestra	7,6	43,1	46,6	10,3	13820	Bituminoso alto volátil C
Naricual	3,7	42,9	54,0	3,1	13830	Bituminoso alto volátil B
Guasare	7,0	35,8	60,4	3,8	14860	Bituminoso alto volátil B
Aricuaisá	22,4	40,7	49,5	9,8	12550	Subbituminoso B
Santo Domingo	18,8	43,4	49,6	7,0	12250	Subbituminoso B
Las Adjuntas	2,7	37,3	58,0	4,7	15220	Bituminoso alto volátil A
Impacto	8,3	47,3	51,4	1,4	11930	Subbituminoso A
Hato La Virgen	1,3	43,5	51,9	4,6	15370	Bituminoso alto volátil A
Santa Teresa	2,5	52,4	45,7	1,9	15290	Bituminoso alto volátil A
San Pedro	21	33,3	53,8	12,8	15010	Bituminoso alto volátil A
Lobatera	0,8	49,8	42,7	7,5	11290	Bituminoso alto volátil C
Pedregal	5,6	37,7	43,9	18,4	12870	Bituminoso alto volátil C
Taguay	15,4	41,8	49,0	9,2	12820	Bituminoso alto volátil C

*Sobre base seca.

**Base seca libre de cenizas

Todas estas normas están claramente explicadas y discutidas en la literatura (ASTM, 1989), y están basadas en análisis convencionales, principalmente por vía húmeda, y diseñados específicamente para carbones.

Resultados y Discusión

La Tabla I incluye la localización de los carbones objeto de estudio, así como la unidad geológica productora. La Tabla II recoge los resultados de los análisis inmediatos y poder calórico; estos resultados permiten el establecimiento del rango del carbón, según la norma ASTM D-388-77, incluido en la misma tabla. Los carbones estudiados oscilan entre lignitos y carbones bituminosos altos en volátiles. Existe una

correspondencia clara entre la edad del carbón y el grado de madurez alcanzada; sin embargo, algunas muestras se hallan muy evolucionadas para su edad (por ejemplo, Pedregal y Fila Maestra) y otras han evolucionado muy poco (Santo Domingo).

Los resultados de los análisis inmediatos indican que los carbones venezolanos son todos de alto contenido de materia volátil (33-55% en peso) respecto al carbón libre de agua y cenizas. Este hecho les confiere buenas propiedades para su uso en la industria carboquímica y carboeléctrica, así como para fines térmicos en general (van Krevelen), 1961, pero limita su utilidad para la fabricación de coque; para concentraciones de volátiles superiores al 30%, se obtendrá un producto de baja resistencia mecánica, no apto para ser usado en siderurgia (Dearbrouck y Hucko, 1981).

Otra característica que favorece el uso de los carbones nacionales para fines energéticos es su bajo tenor en cenizas (menor del 10% en peso en la mayoría de los casos; una excepción es la muestra de Falcón). Estos constituyentes inorgánicos promueven la formación de depósitos de escoria en la superficie de absorción de calor en plantas termoeléctricas que usan carbón como combustible, y pueden generar problemas de corrosión (Dearbrouck y Hucko, 1981).

El poder calórico juega un papel básico en la determinación del valor de un combustible, ya que al comprar éste, lo que se está realmente adquiriendo son unidades de energía. Los datos de poder calórico (base seca libre de cenizas) oscilan entre 11.290 y 15,370 BTU/lb (6.280-8.550 Kcal/Kg), valores que permiten establecer a los carbones venezolanos como útiles, desde el punto de vista comercial, para la generación de energía (Neavel, 1981).



Figura 2. Representación gráfica de la distribución de las diferentes formas de azufre en los carbones estudiados en el presente trabajo. Los números correspondientes son los mismos de la Figura 1.

TABLA III AZUFRE Y SUS FORMAS EN LAS MUESTRAS ESTUDIADAS

Muestra	Azufre Pirítico ±0,05%	Azufre Orgánico ±0,05%	Azufre Sulfático ±0,01%	Azufre Total ±0,05%	lb SO ₂ MM BTU ±0,06
Fila Maestra	1,44 (65)*	0,71 (32)	0,05 (13)	2,28	3,67
Naricual	1,39 (63)	0,79 (36)	0,02 (1)	2,20	3,19
Guasare	0,12 (21)	0,45 (78)	0,01 (1)	0,58	0,81

Aricuaisá	1,31 (50)	1,28 (49)	0,01 (1)	2,60	4,59
Santo Domingo	0,05 (10)	0,40 (80)	0,05 (10)	0,50	0,84
Las Adjuntas	0,17 (28)	0,42 (69)	0,01 (3)	0,61	0,84
Impacto	0,02 (2)	0,76 (89)	0,07 (9)	0,85	1,44
Hato La Virgen	0,60 (43)	0,73 (53)	0,06 (4)	1,39	1,90
Santa Teresa	0,07 (10)	0,52 (72)	0,13 (18)	0,72	0,96
San Pedro	0,05 (0)	0,83 (99)	0,01 (1)	0,85	1,30
Lobatera	0,30 (15)	0,52 (60)	0,04 (5)	0,86	1,54
Pedregal	2,14 (59)	1,07 (30)	0,38 (11)	3,60	6,86
Taguay	1,73 (69)	0,65 (25)	0,14 (6)	2,50	4,30

* Porcentaje respecto a azufre total.

Una propiedad que restringe severamente el uso de algunos carbones nacionales para fines térmicos y de fabricación de coque es el tenor de azufre. Regulaciones ambientales (Padmanabha y Olem, 1991), han conducido a limitaciones en las emisiones de óxido de azufre (SO_2) en plantas de combustión de carbón. El elemento azufre juega un papel importante en la corrosión de los calentadores de aire, economizadores y chimeneas. La pirita, en particular, contribuye a la formación de escorias y a la combustión espontánea del carbón almacenado (Zeilinger, 1982).

Se detectaron tenores de azufre superiores al 1,0% en peso, en las muestras de Fila Maestra, Naricual, Aricuaisá, Hato de la Virgen, Pedregal y Taguay. Estos valores hacen poco interesantes para fines térmicos a los carbones provenientes de los yacimientos aquí mencionados. La Figura 2 muestra en forma gráfica los valores de azufre total y sus formas (pirítico, orgánico, sulfático). Se aprecia en ella que los carbones ricos en azufre son los que poseen la mayor proporción de azufre pirítico. Más de la mitad del elemento en los carbones de Fila Maestra, Taguay, Aricuaisá y un 43% en Hato de la Virgen, es azufre en forma de pirita. Este hecho lleva a proponer la utilización de métodos químicos y físicos de lavabilidad de carbones (Wheelock, 1977; Neavel, 1981; Zeilinger, 1982), a eco de mejorar su calidad para fines térmicos.

De la discusión de los resultados obtenidos de los análisis inmediatos realizados sobre muestras de carbones venezolanos se desprende que las muestras con mejores propiedades para su uso en la generación de energía, debido a sus altos valores de poder calórico y bajos en azufre, son las de Guasare, Las Adjuntas, Santa Teresa y San Pedro del Río. Estos carbones se ajustan al patrón establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Wheelock, 1977), ya que presentan valores inferiores o muy cercanos a 1,2 lb SO_2 /MMBTU (libras de SO_2 por millones de BTU, ver Tabla III). Otros carbones utilizables directamente, aunque con menor rendimiento de energía por unidad de masa de carbón, son los de Santo Domingo, Impacto y Lobatera. Para las muestras de los yacimientos de Fila Maestra, Naricual, Aricuaisá, Hato de la Virgen, Pedregal y Taguay, se recomienda bien sea mezclarlos con otros carbones de menor tenor en azufre (procedimiento común en la explotación del carbón de Fila Maestra, CAVOVEN, 1985) o someterlos a un proceso de lavabilidad de carbones, a objeto de reducir a un mínimo el azufre pirítico y llevar sus concentraciones de azufre total a valores inferiores al 1,0% en peso.



Figura 3. Relación entre el índice de cuarzo (I) y el porcentaje de cenizas para los carbones estudiados. Los números correspondientes son los mismos de la Figura 1.

TABLA IV ANALISIS QUIMICO DE LAS CENIZAS EN LOS CARBONES ESTUDIADOS

MuestraSiO ₂ (±2%)	Al ₂ O ₃ (±1%)	TiO ₂ (±0,2%)	Fe ₂ O ₃ (±1%)	CaO (±0,5%)	MnO (±0,2%)	K ₂ O (±0,1%)	Na ₂ O (±0,1%)	SO ₃ (±0,1%)	P ₂ O ₅ (±0,2%)	MnO ₂ (±0,2%)	
Fila Maestra	35	22	0,7	25	4,1	2,7	1,4	1,1	5,2	0,7	0,19
Naricual	36	21	0,7	28	3,2	1,1	1,7	1,1	5,3	0,7	0,17
Guasare	55	26	0,9	6	3,6	2,8	0,8	0,6	4,3	0,2	0,05
Aricuaisá	44	27	0,8	23	0,9	1,0	1,9	0,2	1,0	13	0,02
Santo Domingo	32	16	0,8	8	21,4	4,0	0,5	1,9	12,4	0,3	0,07
Las Adjuntas	48	30	1,6	11	3,1	0,8	0,4	0,4	3,6	0,3	0,02
Impacto	6	19	2,2	49	4,9	0,6	0,1	0,3	4,2	2,1	0,43
Hato La Virgen	43	29	0,9	23	1,2	0,6	0,9	0,5	<0,1	0,6	0,03
Santa Teresa	5	4	0,6	18	26,9	1,2	0,3	1,9	37,5	0,5	0,25
San Pedro	64	29	2,0	1	0,6	0,6	0,8	0,3	0,8	0,1	<0,02
Lobatera	45	26	0,1	22	2,7	1,4	0,8	0,4	1,0	0,5	0,17
Pedregal	39	25	1,0	23	0,5	0,5	2,0	0,4	7,8	0,4	0,03
Taguay	48	22	0,7	18	2,0	1,4	2,3	2,1	2,2	0,5	0,04

Entre los tipos de azufre, el orgánico es el más importante en los carbones de Guasare, Santo Domingo, Las Adjuntas, Hato de la Virgen, Impacto y San Pedro del Río. La gran mayoría del azufre en carbones proviene de la reducción de los iones sulfato presentes en las aguas naturales (van Krevelen, 1961; Given, 1984). El sulfato es el segundo anión en abundancia en aguas salinas, pero está presente en muy bajas concentraciones en aguas dulces (Mason, 1982). Tanto el azufre orgánico, como el azufre piritico singenético, provienen de la actividad de bacterias sulfato-reductoras tipo *Disulfovibrio desulfuricans*, las cuales utilizan enzimáticamente el oxígeno de los iones sulfato y liberan iones sulfuro. Estos se combinan con hidrógeno del agua para formar H₂S, reaccionan con hierro para producir piritita, o con grupos funcionales orgánicos oxigenados para transformarse en azufre orgánico; en consecuencia, acumulaciones

de turba en ambientes deposicionales influenciados por condiciones marinas, tenderán a generar mantos de carbón ricos en azufre (Martínez y López, 1989). Los resultados obtenidos en el presente estudio permiten proponer influencia marina en los paleoambientes de sedimentación de los yacimientos carboníferos de Fila Maestra, Naricual, Aricuaisá, Hato de la Virgen, Pedregal y Taguay.

La Tabla IV presenta los resultados del análisis químico de las cenizas obtenidas por combustión a altas temperaturas de los carbones estudiados. Estas cenizas están constituidas principalmente por óxidos y sulfatos, y no deben ser confundidas con el término "materia mineral" el cual representa los minerales inorgánicos no alterados del carbón. Sin embargo, a partir de estos datos y de los valores obtenidos de la determinación de las formas de azufre (Tabla III), se procedió a calcular la composición mineralógica de las cenizas, por medio de análisis normativo (modificado de Pollack, 1979). Los resultados se muestran en la Tabla V.

Un análisis de la composición normativa de los carbones venezolanos permite extraer algunas ideas. En primer lugar, no todas las muestras presentan cuarzo normativo, lo cual permite diferenciar carbones de distinta procedencia, en términos de la composición relativa de los elásticos aportados a las zonas de acumulación de turba. A este fin, se determinó el "índice de cuarzo" (Tabla V), que relaciona la concentración de cuarzo con la suma de las concentraciones de las arcillas illita y caolinita. El índice de cuarzo proporciona información sobre dos variables que afectaron la deposición de los carbones: energía del medio sedimentario y composición de la fuente de sedimentos. En el caso que nos ocupa, la energía del medio sedimentario no afectó los valores para carbones, como se aprecia en la Figura 3, donde no se observa correlación alguna entre el índice de cuarzo y las variaciones de energía, medidas a través de la concentración de cenizas. Por consiguiente, los cambios en el parámetro medido (I_q) son debidos exclusivamente a diferencias composicionales en la fuente.

Los carbones del Paleoceno en el Occidente de Venezuela (Guasare, San Pedro del Río, Las Adjuntas), correlacionados cronoestratigráficamente (formaciones Los Cuervos y Marcelina), presentan valores de índice de cuarzo superiores a 12, en tanto que las muestras del Eoceno-Oligoceno (Hato de la Virgen, Santa Teresa, Aricuaisá), pertenecientes a la Formación Carbonera, arrojan valores del índice de cuarzo inferiores a 7. Este hecho hace pensar en una fuente de aporte de elásticos del Paleoceno, de carácter silíceo, probablemente rocas félsicas de la Cordillera Andina Central de Colombia, la cual constituía áreas positivas ya en el Paleoceno. Dicha idea concuerda con un Paleo-Magdalena como cauce fluvial de transporte de tales sedimentos (González de Juana *et al.*, 1980).

En contraste con la situación del Paleoceno, los carbones de origen Eoceno-oligocénico del área (Formación Carbonera) presentan una fuente pobre en cuarzo y abundante en arcillas, como productos de meteorización de micas y feldespatos. Las consideraciones anteriores permiten sugerir otras fuentes de elásticos para Carbonera. Cabe mencionar que el valor de 24 del índice de cuarzo para los carbones de Santo Domingo permite asociarlos con los de edad Paleoceno, específicamente a la Formación Los Cuervos. Este resultado apoya decididamente a las aseveraciones de Kiser (1989) respecto a que los carbones de Santo Domingo están erróneamente asignados a la Formación Carbonera, en lugar de estarlo a la Formación Los Cuervos.

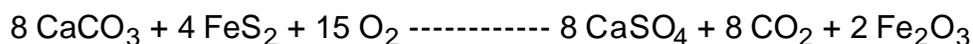
TABLA V ANALISIS NORMATIVO Y OTROS INDICES GEOQUIMICOS

Muestra	Cuarzo	Illita	Caolinita	Calcita	Pirita	Apatito	Índice de Cuarzo	Ti/Al	Nº/Co
Fila Maestra	3	22	45	3	19	4	5	0,04	0,28
Naricual	4	26	40	1	39	4	6	0,04	0,36
Guasare	21	12	60	5	5	1	29	0,04	0,17
Aricuaisá	4	29	54	0	18	2	5	0,03	0,23

Santo Domingo	11	8	37	35	1	2	24	0,06	0,09
Las Adjuntas	11	6	73	3	5	2	14	0,06	0,13
Impacto	0	2	11	0	2	9	0	0,13	0,06
Hato La Virgen	5	14	66	0	17	2	6	0,04	0,43
Santa Teresa	0	5	6	34	5	3	0	0,17	0,07
San Pedro	27	12	67	0	0	1	33	0,08	0,52
Lobatera	11	12	60	1	6	3	15	0,01	0,15
Pedregal	1	31	48	0	16	2	2	0,05	0,46
Taguay	3	35	38	0	25	3	17	0,04	1,09

El índice de cuarzo para el yacimiento de Fila Maestra presentó un valor de 5; este dato corresponde bastante bien con los resultados obtenidos para Naricual (6) y Taguay (4), lo cual permite proponer una fuente de clásticos similar en estos carbones, ubicados al noreste de Venezuela. Para las muestras de Pedregal (Edo. Falcón) y Cerro Impacto (Edo. Bolívar) no se dispone de otros carbones geológicamente asociados para fines comparativos.

Los carbones con mayor contenido de calcita normativa (Santo Domingo y Santa Teresa) presentan también el mayor tenor de azufre tipo SO_3 en las cenizas. El azufre presente aún en las cenizas de alta temperatura constituye una medida de la proporción de calcita original en la muestra, ya que este mineral (también la siderita y la dolomita) fijan el azufre reducido, en las condiciones que tienen lugar durante la formación de cenizas, de acuerdo a la ecuación (Ramírez, 1988):



Los datos presentados en la Tabla IV permitieron el cálculo de varias relaciones interelementales, citadas en la literatura especializada como indicadores geoquímicos. La relación Ti/Al (Tabla V), propuesta por Bhatt como índice paleoclimático, arroja valores muy similares entre sí para la mayoría de las muestras, lo cual permite inferir condiciones paleoclimáticas similares, aún en distintos tiempos geológicos; el valor distintivamente superior, obtenido para los carbones de Santa Teresa y Cerro Impacto, implica condiciones deposicionales más húmedas que para el resto de los carbones venezolanos.

La relación Na/Ca (Tabla V), propuesta por Stadnikoff (en Ernst, 1970) como índice de paleosalinidad en ambientes deposicionales de carbón, en conjunción con los tenores de azufre (Tabla III; Figura 2) permite hacer inferencias paleoambientales en muestras pertenecientes al mismo intervalo estratigráfico. Así, dentro de la Formación Los Cuervos, estos indicadores geoquímicos permiten proponer que hacia San Pedro del Río (Táchira Norte) las condiciones de salinidad en las turberas eran decididamente mayores (Na/Ca = 0,52; [S] = 0,85%) que hacia Las Adjuntas (Na/Ca = 0,13; [S] = 0,61%) y Santo Domingo (Na/Ca = 0,09; [S] = 0,50%) admitiendo este último yacimiento, ubicado en Táchira Sureste dentro de la Formación Los Cuervos. Para la Formación Carbonera, los datos obtenidos sugieren que hacia Santa Teresa (Mérida, Na/Ca = 0,07) las condiciones de paleosalinidad de las turberas fueron menores que hacia Aricuaisá (Zulia, Na/Ca = 0,23) y Hato de la Virgen (Táchira, Na/Ca = 0,43). Esta última afirmación recibe apoyo de otros indicadores independientes de influencia marina, como es el tenor de pirita, mucho mayor en Hato de la Virgen (13,7%) y Aricuaisá (14,47%) que en Santa Teresa (5,28%), (Tabla V).

Una comparación entre las distintas cuencas carboníferas venezolanas, en términos de los parámetros antes utilizados, es poco válida en términos de sus distintas edades y diferentes fuentes de aporte sedimentario. Sin embargo, considerando los tenores de azufre total y pirítico, se puede generalizar que las condiciones de salinidad fueron mayores para los carbones de la Cuenca Oriental de Venezuela (Fila

Maestra, Naricual y Taguay) y de Falcón (Pedregal) que los de la Cuenca del Lago de Maracaibo (Edos. Táchira, Mérida, Zulia) y del Cerro Impacto (Edo. Bolívar), el cual en general se aparta de todas las generalizaciones anteriores.

El carbón de Impacto merece una consideración especial. Esta muestra, de edad desconocida, aunque las relaciones de campo hacen pensar en el Cenozoico (R. Sifontes, comunicación personal), tuvo como principal fuente de sedimentos a las carbonatitas del Cerro Impacto. Este hecho se refleja en los bajos valores de sílice, óxido de potasio, y altos de P_2O_5 , TiO_2 y Fe_2O_3 , que se traducen en la ausencia de cuarzo normativo y muy baja concentración de illita y caolinita. Además, esta muestra es rica en Nb, Y, V, Cr, Ba y otros elementos poco comunes en otros carbones (Martínez *et al.*, 1989). Estas diferencias, aunadas a las petrográficas (Scherer *et al.*, 1990) y a las obtenidas por geoquímica orgánica (Martínez *et al.*, 1989) permiten diferenciar marcadamente al carbón de Impacto de los restantes, y ameritan un estudio geoquímico detallado, el cual está en progreso.

TABLA VI DISTRIBUCION MACERAL, REFLECTANCIA DE LA VITRINITA (R_o), INDICE DE GELIFICACION DE LOS TEJIDOS (IGT) Y CLASIFICACION PETROGRAFICA, EN LAS MUESTRAS

Muestra	% Vitrinitas Huminitas*	% Exinitas*	% Inertinitas	R_o	IGT	Clasificación Petrográfica
Fila Maestra	93,2	5,9	0,9	0,53	109	Bituminoso alto volátil C
Naricual	96,8	2,3	0,9	0,64	108	Bituminoso alto volátil A
Guasare	87,4	0,9	11,7	0,60	7	Bituminoso alto volátil B
Aricuaisá	94,9	4,9	0,2	0,42	475	Subbituminoso
Santo Domingo	90,2	2,8	7,0	0,38	13	Subbituminoso
Las Adjuntas	87,0	3,6	9,4	0,74	9	Bituminoso alto volátil A
Impacto	85,3	14,7	0	0,35	n. d.	Lignito
Hato La Virgen	96,7	3,3	0	0,56	n. d.	Bituminoso alto volátil A
Santa Teresa	75,6	23,8	0,6	0,47	126	Subbituminoso
San Pedro	96,3	0	3,7	0,74	26	Bituminoso alto volátil A
Lobatera	90,6	8,8	0,6	0,56	151	Bituminoso alto volátil C
Pedregal	96,6	2,7	0,6	0,66	161	Bituminoso alto volátil A
Taguay	98,4	1,5	0,1	0,55	984	Bituminoso alto volátil A

* = Sobre base libre de material mineral (determinado por Petrografía orgánica).

n. d. = no determinado.

R_o = Reflectancia de la vitrinita.

IGT = Índice de Gelificación de los Tejidos.

Se ensayaron otras relaciones interelementales, como Ca/Mg, Al/Si y P/Ca, pero éstas no aportan información nueva a las interpretaciones ya discutidas.

Los resultados de los análisis de macerales, y la reflectancia promedio de la vitrinita (R_o), se presentan en la Tabla VI. La distribución de macerales y valor de R_o , permiten presentar una clasificación petrográfica (Barr, 1978) atendiendo al rango de los carbones, la cual se incluye en la Tabla VI.

La clasificación petrográfica se ajusta a la derivada por las normas ASTM (Tabla II) excepto en dos muestras: Impacto y Santa Teresa. Los valores de R. para estas muestras (0,35 y 0,47, respectivamente), corresponde a carbones de menor rango, no acordes con su asignación como carbones bituminosos de alto volátil, obtenida según ASTM. La discrepancia se debe al carácter sapropélico de estos carbones; las concentraciones de exinitas (14,6 y 23,7% respectivamente) son muy superiores a las determinadas en el

resto de las muestras, lo cual les confiere valores de poder calórico mayores que los de otros carbones húmicos de madurez térmica comparable (R_o similar).

Los macerales pertenecientes al grupo de las exinitas (alginitas, resinitas, esporinitas, bituminitas, exudatinitas, etc.), derivados de restos de vegetales que son ricos en lípidos, poseen concentraciones de hidrógeno superiores a los restantes grupos macerales y, además, son de carácter pronunciadamente alifático. En consecuencia, los carbones exiniticos (de carácter sapropélico) son más ricos en enlaces simples C-C y C-H; estos enlaces son más energéticos, y su ruptura genera más calor que en el caso de los carbones húmicos *sensu stricto* de igual rango, donde predominan los enlaces dobles C=C en sistemas aromáticos conjugados. Por consiguiente, el poder calórico, que no es más que la suma de las contribuciones energéticas de todos los enlaces que son destruidos por la combustión, para generar los enlaces mucho más estables del CO_2 y H_2O respectivamente, sufrirá un incremento apreciable por la mayor proporción de componentes exiniticos en los carbones, explicando de esta manera las discrepancias entre las clasificaciones petrográficas (basadas en madurez térmica del carbón) y la de la ASTM (basada en los análisis inmediatos), al ser aplicada a los carbones altos en exinitas del presente estudio.

En la Figura 4 se muestra un gráfico triangular cuyos vértices representan a cada uno de los tres grandes grupos macerales: vitrinitas, inertinitas y exinitas. En ella se incluye todos los carbones analizados en el estudio. Se identificaron tres familias de carbones: Los esencialmente húmicos o ligeramente húmico-exiniticos (Taguay, Hato de la Virgen, Pedregal, Aricuaisá, Fila Maestra y Lobatera); los húmicos fuertemente exiniticos (Santa Teresa, Impacto) y los húmico-inertiniticos (Guasare, San Pedro del Río, Las Adjuntas y Santo Domingo). Sorprendentemente, todos los carbones paleocenos se ubican en este último grupo, lo cual permite derivar que:

- a) El carbón de Santo Domingo, cuya ubicación estratigráfica es dudosa, según lo antes expuesto, presenta una mayor correspondencia con las muestras de la Formación Los Cuervos (Paleoceno) que con Carbonera (Eoceno-Oligoceno).
- b) Las composiciones petrográficas distintas para carbones de varias edades geológicas, aún en la misma área geográfica, apuntan fuertemente hacia diferentes condiciones de acumulación de la materia orgánica.



Figura 4. Gráfico triangular de distribución maceral. Los números correspondientes son los mismos de la Figura 1.

Este último ítem amerita un análisis más detallado. Las diferencias en el régimen de sedimentación de los restos biogénicos implica posiblemente (Liguois y Doubinge, 1991):

- i) Diferentes tipos de biota.
- ii) Regímenes tectónicos diferentes.
- iii) Divergencias en la constancia del nivel freático.
- iv) Cambios paleoclimáticos importantes.

Las consideraciones anteriores no son excluyentes entre sí; de hecho, es muy posible que la razón de los cambios petrográficos observados entre los carbones del Paleoceno y los más jóvenes sea una combinación de los factores antes nombrados.

Donde no parece haber dudas es que los valores relativamente altos de inertinita en los carbones de las formaciones Los Cuervos y Marcelina, pueden constituir un parámetro de identificación y correlación de unidades, ya que la Formación Carbonera no presenta esta característica; más bien, predominan tanto en ellos como en los carbones de Oriente y Falcón, los componentes petrográficos del grupo de las exinitas sobre las inertinitas.

Los carbones con mayores características sapropélicas (Impacto y Santa Teresa) corresponden a casos particulares. El de Santa Teresa (Formación Carbonera) arroja un valor alto (23,7%) de exinitas, de las cuales más de la mitad corresponden a esporinitas, restos de esporas o polen preservados o levemente alterados. Para la muestra de Cerro Impacto, predominan las resinitas, aunque también parecen existir restos de algas (Martínez y López, 1989; Scherer et al., 1990).

Se calculó el índice de gelificación de los tejidos (IGT) en su expresión simplificada original (Liguois y Doubinge, 1991) para los carbones (Tabla VI). Este parámetro relaciona la proporción de vitrinitas a inertinitas, y constituye una medida del grado de preservación de los materiales orgánicos originales. En el presente estudio, el IGT permitió diferenciar a los carbones paleocenos (IGT < 30) de los oligomiocenos (IGT > 100). Bajo el enfoque dado por la literatura (Liguois y Doubinge, 1991) al IGT, se puede pensar que las diferencias antes mencionadas fueron ocasionadas por cambios importantes en el nivel freático de los pantanos y marismas. Estos cambios pudieron ser estacionales, o más probablemente aún, su origen se asociaría a un control tectónico sobre la subsidencia de la cuenca (MacCabe, 1991).

Correlación entre la Información Petrográfica y Geoquímica

Las interpretaciones parciales de los resultados obtenidos en el presente estudio admiten un análisis global, correlacionando la información derivada de la petrografía orgánica y la geoquímica.

Existe un conjunto de evidencias que permiten diferenciar los carbones de distintos yacimientos entre sí y, en particular, los paleocenos de los más jóvenes. Para el caso especial de los carbones de la Cuenca del Lago de Maracaibo, se aprecian divergencias tanto en la fuente de aporte de clásticos (índice de cuarzo), en la cercanía a la línea de costa (relación Na/Ca, tenor de azufre) y en la composición maceral (concentración de inertinitas, IGT), entre los carbones de las formaciones Los Cuervos y Marcelina (Paleoceno) y Carbonera (Eoceno Tardío-Oligoceno). Todos estos contrastes apuntan hacia condiciones físico-químicas de acumulación de la turba notablemente diferentes, cuyo control es indudablemente tectónico. Por ejemplo, en la región de Guasare existió, hace unos 60 millones de años (Zambrano *et al.*, 1969), un área de gran estabilidad tectónica, que permitió una deposición muy uniforme de restos orgánicos. Esto dio origen a los grandes mantos de carbón que existen actualmente en Guasare, de excelente homogeneidad y escasa

presencia de materia mineral. Una situación similar se estableció para los yacimientos de Santo Domingo y Las Adjuntas (Formación Los Cuervos). La literatura especializada (González de Juana *et al.*, 1980; Kellog, 1981) refiere que a partir del Eoceno se registró un cambio en los patrones de erosión y subsidencia de toda la región Norte de América del Sur, asociado con la interacción entre las placas tectónicas del Caribe y Suramérica (Vásquez y Dickey, 1972). Este evento afectó decididamente la composición química y petrográfica de los carbones acumulados a partir de ese momento. Durante el Eoceno Tardío-Oligoceno existió una gran inestabilidad tectónica en la parte sur de la Cuenca del Lago de Maracaibo (Khon *et al.*, 1984) con formación de ambientes de marismas y lagunas seguido de hundimientos y levantamientos sucesivos, lo que condujo a la formación de mantos de poco espesor y alta heterogeneidad, con intercalaciones lutíticas, tenores relativamente altos de materia mineral asociada y, en algunos lugares, formaciones de carbones ricos en liptinitas. Estas características son típicas de los carbones de la Formación Carbonera y se hacen extensivas a los restantes carbones post-paleocenos en Venezuela.

No se apreciaron marcadas diferencias entre los carbones de la Cuenca Oriental de Venezuela (Naricual, Taguay, Fila Maestra) al ser comparados entre sí geoquímica y petrográficamente. Se requieren indicadores geoquímicos más finos (geoquímica orgánica o elementos traza) a fin de establecer diferencias entre ellos.

Los carbones del Estado Falcón guardan más semejanza por edad, petrografía orgánica y geoquímica, con los carbones de la Cuenca Oriental, a juzgar por sus tenores de azufre, composición química y normativa de las cenizas, rango y distribución maceral. Esta semejanza alcanza a las condiciones de acumulación biogénica.

El carbón del Cerro Impacto no guarda relación alguna con los restantes carbones venezolanos. Se trata evidentemente de una cuenca carbonífera muy particular, con una fuente de clásticos no convencional, y unas condiciones paleoclimáticas, tectónicas y petrográficas inusuales, que ameritan un estudio particular sobre el mismo.

REFERENCIAS

American Society for Testing Materials (D^o): *Annual book of the ASTM*. Philadelphia, D-388-89.

Bhatt, J. J. (1974): Ti/Al ratio as chemical index of paleoenvironment-A note: *Chemical Geology*, 13: 75-78.

CAVOVEN (1985): *El carbón de Fila Maestra*: Clarines, Informe interno, 17 p.

Dearbrouck, A. W. and Hucko, R. E. (1981): Coal preparation, in: Elliot, M. A., editor *Chemistry of coal utilization*: New York, Wiley, pp. 517-608.

Ernst, W. (1970): Geochemical facies analysis, in: *Methods in Geochemistry and Geophysics*, vol. 11: Amsterdam, Elsevier, 270 P.

Given, P. H. (1984): An essay on the organic geochemistry of coal, in: Gorbaty, M. L. *et al.*, eds., *Coal Science*, vol. III: New York, Academic Press, pp. 63-252.

González de Juana, C Iturralde de A. J., y Picard, X (1980): *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*: Caracas, Ediciones Foninves, 1031 p.

Kapo, G. y López, V. (1971): Anomalías en las cuencas carboníferas de Venezuela: Margarita, *Memorias de la VI Conferencia Geológica del Caribe*, pp, 65-71.

Karr, C. (1978): *Analytical methods for coal and coal products (vol. 1)*: New Cork, Academic Press, pp.

15.

Kiscr, G. D. (1989): Relaciones estratigráficas de la cuenca Apure/Llanos con áreas adyacentes Venezuela Suroeste y Colombia Oriental: *Monografías de la Sociedad Venezolana de Geólogos*, N° 1, 71 p

Kellog, J. N. (1981): *The Cenozoic basement tectonics of the Sierra de Perijá, Venezuela and Colombia*, Princeton University of Princeton, Ph.D. Thesis.

Kohn, B., Shagham, R., Banks, P. and Burkley, L. (1984): Mesozoic-Pleistocene fissiontrack ages on rocks of the Venezuelan Andes and their tectonic implications, in Bonini, W. E., Hargraves, R. and Shagam, R., eds., *The Caribbean-South America plate boundary and regional tectonics: Geological Society of America*, Memoir 162, pp. 365-384.

Krevelen, D. W. van (1961): *Coal*: Amsterdam, Elsevier, 513 p.

Liguois, R. and Doubinger, J. (1991): Petrology, palinology and depositional environments of the "Grande Couche de Bourran" from the Stephanian Basin of Decazeville, France: *Bull. Soc. Geol. France*, vol. 162: N° 2, pp. 307-324.

MacCabe, P. J. (1991): Tectonic controls on coal accumulation: *Bull. Soc. Geol. France*. vol. 162: N° 2, pp. 277-282.

Martínez, M. y López, C. (1988): Caracterización geoquímica del carbón de Fila Maestra, Estado Anzoátegui: concentración y distribución de elementos minoritarios y trazas: Maracaibo, *Memorias de las II Jornadas Geológicas del Carbón*, pp. 65-80.

Martínez, M. y López, C. 1989): Distribución lateral y vertical de constituyentes inorgánicos en un manto de carbón del yacimiento de Fila Maestra, Estado Anzoátegui, Barquisimeto, *Memoiras del IV Congreso Geológica Venezolano*. Tomo IV pp. 1897-1916.

Martínez, M. y Mora, A. (1991): Evidencias de afinidad orgánica del calcio en carbones del Frente de Montañas de Guárico, Venezuela. *Acta Científica Venezolana*, 42 (2): 100-101.

Martínez, M., Escobar, M. y Galarraga, F. (1989): Caracterización geoquímica preliminar de algunos carbones venezolanos: Barquisimeto, *Memorias VII Congreso Geológico Venezolano*, Tomo IV, pp. 1877-1896.

Mason, B. and Moore, C. B. (1992): *Principles of Geochemistry* (4th edition): New York, Wiley, 344 p.

Neavel, R. C. (1981): Origin petrography and classification of coal, in Elliot, M, A., editor, *Chemistry of coal utilization*: New York, Wiley, pp. 91-158.

Padmanabha, A., and Olen, H. (1991): The New Clean Air Acta: *Water, Environment and Technology*, 3 (5): 40-46.

Pollack, S. (1979): Estimating mineral matter in coal from its major inorganic elements: *Fuel*, 58: 76-78.

Ramírez, A. (1988): Geochemistry of nutrient elements in water and sediment of the Tuy River Basin, Venezuela: Pennsylvania State University, *Dept. of Geosciences, Ph.D. Thesis*, 259 p,

Scherer, W., Jorddn, N. y Sifontes, R. (1990): Carbón sapropélico del Cerro Impacto: *Caracas, II Congreso Latinoamericano de Geoquímica Orgánica*, Resumen de ponencias, pp. 84.

Scoanes, R. (1967): Estudios sobre carbones venezolanos: *Revista de la Sociedad Venezolana de Química*, 7: N9 1, pp. 25-39.

Vásquez, E. and Dickey, P. (1972): Major faulting in north-western Venezuela and its relation to global tectonics: Porlamar, *Memorias VI Congreso Geológico del Caribe*, Tomo 1, pp. 191-202.

Wheelock, T. D. (1977): Coal desulfurization: Chemical and Physical methods: Washington, D.C., ACS *Symposium Series*, 64: 332 p.

Zambrano, E., Vásquez, E., Duval, B., Latreille, M. y Coffinieres, B. (1969): Síntesis paleográfica y petrolera del occidente de Venezuela. Caracas, *Memorias del IV Congreso Geológico Venezolano*, *Bol. Geol., Publicación Especial* 5: 483-545.

Zeilinger, J. E. (1982): Preparation characteristics of coals from the Ohio coalfield: *U.S. Bur. Mines Rep. Invest.* N. 7616. 72 p.

