

ORIGEN Y FORMACION DEL CARBON

POR

LUCAS RODRIGUEZ PIRE

Catedrático de la Química Técnica de la Universidad de Oviedo

Importancia industrial del carbón

Desde que el estudio microscopio de los carbones hizo evidente el origen vegetal de los mismos, quedó planteado el problema de explicar el proceso por el cual la primitiva materia vegetal llegó a transformarse en carbón y el por qué de la variedad de tipos de carbón que se conocen.

La primitiva clasificación en turba, lignito, hulla y antracita, basada en caracteres externos, fácilmente reconocibles en una estructura vegetal, cada vez más difícil de identificar, y en un creciente contenido en carbono, parece marcar jalones de un mismo proceso de transformación: *la Carbonización*. Esta primitiva intuición, que ha sido objeto, y sigue siéndolo, de una copiosísima discusión, tiene, aun hoy, carácter de vigencia.

Parece pues lógico que comencemos este estudio examinando las condiciones en que se ha formado la turba, y sigue formándose aun en nuestros días.

*Las turberas*¹

La turba (según definición de Haug) es una materia carbonosa que resulta de la fermentación, en el propio lugar, de vegetales

que forman praderas húmedas conocidas con el nombre de turberas.

La materia vegetal de las distintas plantas no alcanza el mismo grado de transformación. Las fibras poco alteradas forman una especie de fieltro cuyos intersticios se rellenan, en parte, con el producto de la transformación más completa de otras partes vegetales, en forma de substancia pulverulenta muy oscura, constituida por derivados húmicos. Estos productos ácidos dan a la turba propiedades asépticas y son los que colorean en pardo oscuro a las aguas que atraviesan regiones turbosas.

El contenido en carbono de la turba varía de 45 a 60 por ciento, aproximadamente.

Los vegetales que principalmente constituyen la turba son ó esencialmente hidrófilos, capaces de almacenar en sus tejidos cantidades considerables de agua ó xerófilos, en cuyo caso su pie se encuentra sumergido en el agua.

Unos y otros se desarrollan en altura mientras sus partes inferiores mueren y se descomponen.

Para que pueda formarse la turba, es preciso que el agua no esté excesivamente estancada, ni su corriente sea excesiva. Esto último ocasionaría arrastre de las substancias antisépticas que preservan a los vegetales de una descomposición excesivamente rápida. Su temperatura más conveniente es de unos 8.º C. Una temperatura excesivamente alta impediría la absorción de agua por los musgos hidrófilos. Por ésto, las turberas suelen encontrarse solamente entre los paralelos 43.º y 70.º.

Suelen presentarse formando una superficie encharcada en que la turba se encuentra a más o menos profundidad.

Existe un tipo de *turbera plana* (Flachmoor, flat bog) ó turbera pantanosa, formada por plantas acuáticas (juncos, etc,) cuya descomposición debajo del agua forma la turba.

Hay otro tipo de *turbera combada* (Hochmoor, raised bog) ó turberas de montaña en las que, sobre un suelo más seco y generalmente silicioso, se encuentran musgos de tallo largo (género Sphagnum) que forman un tupido tapiz empapado de agua.

Las turberas pueden transformarse en páramos y recíproca-

mente, según que las condiciones sean más o menos desfavorables. A su vez, el páramo se deriva del bosque cuando éste agota las reservas de ácido fosfórico y de cal.

Así vemos que en países fríos como Dinamarca, Suecia y Siberia meridional, los bosques van siendo sustituidos por turberas. Por otra parte, es posible reconquistar, para el cultivo, a las turberas naturales. Se han colonizado turberas, por ejemplo, en Holanda y en el norte de Alemania mediante un drenaje y aportación de elementos minerales.

En las turberas de los valles, las plantas predominantes son ciperáceas y gramíneas xerófilas; sus rizomas entretreídos se sumergen en una especie de humus; en la superficie, flotan musgos del género *Hipnum*.

Por el contrario, las turberas de las planicies y de las laderas, están constituidas especialmente por musgos hidrófilos que mantienen la humedad de la turbera sin que ésta esté sumergida. Las turberas de este tipo crecen constantemente en altura, acabando por elevarse sobre los terrenos que las rodean y su superficie toma una forma convexa de casquete. Suelen encontrarse en lugares en que primitivamente existió una turbera sumergida.

En la turba más superficial y de reciente formación, se conserva visible la estructura de los residuos vegetales, distinguiéndose en ella ramitas entrelazadas (turba musgosa) mientras que en las partes más profundas, de más antigua formación, se encuentran ramas más gruesas o troncos en medio de una materia compacta, de color oscuro (turba negra o piciforme) que se ha hecho más compacta bajo el peso de las capas superiores.

Así pues, de arriba abajo, se encuentran sucesivamente:

- a) turba musgosa, ligera, esponjosa, de color amarillo más o menos oscuro.
- b) turba hojosa, de color chocolate, en que aun se distinguen las plantas que la formaron.
- c) turba negra.

Entre las capas b) y c), se encuentran a veces trocitos de cor-

teza, de tronco o de ramas de abedul que conservan su estructura y aun troncos de roble bien conservados.

En las turberas sumergidas, la formación de turba suele ser constante; pero en las turberas de montaña, suele detenerse al cabo de mucho tiempo encontrándose una verdadera turba fósil, como en algunas regiones del Limousin en las que, según Vazeille, comenzó a formarse la turba al principio de la época neolítica o quizá antes. Los bosques que, entonces, poblaban los pequeños valles tallados por los glaciares, fueron invadidos poco a poco por turberas y sus árboles perecieron por falta de aire alrededor de las raíces.

Estas turberas de los valles son generalmente de pequeña extensión y formadas por especies vegetales muy limitadas.

En cambio, las de las planicies pueden alcanzar extensiones muy considerables sobre todo si se encuentran sobre suelos nivelados por glaciares y tapizados de lodo glaciar en el que las plantas han podido proliferar. En Babiera y en Sajonia, este tipo de turberas alcanza extensiones de varios miles de hectáreas sin más vegetación original que musgos, plantas acuáticas y helechos. También en los Estados Unidos y en Canadá, los grandes glaciares recubrieron el suelo con una masa de arcilla, gravas y cantos rodados, que rellenaron los valles, dejando algunas depresiones en las que se formaron lagos, que quedaron convertidos en turberas, cuando las condiciones climáticas fueron adecuadas.

Existen también turberas de tipo marítimo, en las que se encuentran restos de plantas terrestres y de algas, que se formaron al abrigo de una barra de cantos rodados. En el litoral de Europa, suelen encontrarse a unos ocho o nueve metros por debajo del nivel del mar.

En estas turberas, según Maack, se desarrollaron primeramente plantas acuáticas cuyas hojas formaron en la superficie un continuo tapiz sobre el cual se fijó una capa de musgos, cada vez más espesa, revestida de *Vaccinium oxycoccus*. Al descender luego de nivel, por drenaje o por alguna otra causa, pudieron recubrirse de una delgada capa de agua estancada en la que se desarrollaron plantas herbáceas de tipo ácido que en otoño e invierno se des-

componen con formación de ácidos húmicos, naciendo en primavera y verano nuevas plantas, prosiguiéndose dicho ritmo.

Teorías acerca de la acumulación de la materia vegetal²

Si comparamos las grandes cantidades conocidas de carbón con la masa mucho mayor aun de la materia vegetal que ha sido necesaria para formarlo y contemplamos, por otra parte, la pobre vegetación existente sobre las turberas actuales; si consideramos, además, la gran extensión y superposición reiterada de gruesos filones de hulla, separados por imponentes masas de rocas sedimentarias, surge inmediatamente la cuestión de la forma en que ha sido posible la acumulación, en determinados lugares, de tan enorme cantidad de masas vegetales, ya que el carbón actual es solo un 10 por ciento del peso de la materia vegetal que lo originó.

Dos teorías han ido acumulando argumentos en que apoyar sus respectivos puntos de vista para explicar la formación de tales depósitos. Según una de ellas, la más antigua, las plantas se fueron acumulando en el lugar mismo en que se han desarrollado. Según la otra, las materias vegetales han sido transportadas y acumuladas mediante un arrastre por el agua.

El origen de la materia vegetal sería pues *autóctono* o *alóctono* respectivamente, según los nombres con que han sido designados por von Gumbel.³

Teoría del origen autóctono

Según esta teoría, establecida en 1778 por Beroldingen⁴, en Alemania e independientemente por Deluc⁵, en Francia, al siguiente año, el carbón se formó con los residuos de las plantas acumuladas en turberas pantanosas y fueron recubiertos después por sedimentos, experimentando posteriormente cambios que produjeron la variedad actual de carbones, desde la turba a las antracitas.

Esta teoría está basada en los principales argumentos siguientes:

1.—El contenido, generalmente bajo, en materias minerales de los carbones parece incompatible con un transporte en gran esca-

la de las materias vegetales, las cuales serían acompañadas forzosamente por cantidades aun mayores, de materias minerales⁶.

2.—La existencia de esquistos arcillosos debajo de casi todas las capas de hulla permite creer en la existencia de antiguos suelos en los que pudieron desarrollarse las plantas⁷.

3 —La amplia extensión de muchas capas de carbón solo podría desarrollarse en extensas areas de vegetación.

4.—La distribución y acondicionamiento de las partículas vegetales no es la que corresponde a un arrastre de materiales⁸.

5.—La presencia en el carbón de troncos con raíces en los esquistos arcillosos indica un crecimiento *in situ*⁹.

6—Actualmente se están formando *in situ* grandes depósitos de turba, de amplia extensión, los cuales convertidos en hulla, formarían capas de extensión, configuración y pureza comparables a las del Carbonífero¹⁰.

7—Se observa en la actualidad una lenta sumersión en los bosques de la costa de Rotterdam¹¹.

De estos argumentos, el quinto es uno de los más impresionantes. Potonié¹² se decidió por esta teoría despues de haber estudiado los testigos de un sondeo de 750 m de longitud, en la Alta Silesia, que cortaba veintisiete filones de carbón y, en cada uno, un suelo arcilloso con estigmarias, aunque seguía admitiendo el origen alóctono en casos excepcionales de antiguos meandros rellenos con maderas arrastradas en las mareas altas, como ocurre actualmente en el Bajo Mississipi.

Ha descrito también el autor ultimamente citado una turbera fósil del Mioceno, que se ha transformado en lignito, donde han crecido varias generaciones de bosques.

Esta teoría fué combatida desde su origen y a lo largo de todo el siglo XIX, por muchos geólogos, botánicos y químicos. Jukes¹³, p. ej., no encontraba satisfactoriamente explicada la discontinuidad de las rocas y la frecuente alternancia de rocas estériles y capas de carbón por lo que Hall¹⁴ hubo de introducir el concepto de *subsistencia* o descenso lento y uniforme en grandes extensiones; pero escalonado con períodos de vegetación en cada uno de estos escalones. Grim señaló que los esquistos arcillosos difieren en perfil

del de los suelos normales, objeción confirmada por Gresley¹⁵ haciendo observar la naturaleza caliza de los mismos y la ausencia de estigmarias en los esquistos hulleros de Pittsburgo y en otras varias pizarras carboníferas, etc., etc.

La teoría del *origen alóctono* tiene quizá su más remoto antecedente en las erróneas ideas de Hutton¹⁶, en 1795, quien creía formado el carbón por materia orgánica soluble y partículas de hollín de bosques incendiados, arrastradas hasta el mar por las corrientes de agua dulce.

Grand'Eury¹⁷, a quien algunos autores atribuyen el origen de esta teoría, suponía, en 1882, que las plantas se descomponían en el lugar de su crecimiento siendo arrastrados sus residuos a lugares de agua tranquila donde se sumergían; pero el verdadero fundador de esta teoría fué Fayol¹⁸ en 1887, quien considera al carbón originado por la segregación, como producto menos denso, de los residuos vegetales arrastrados con materiales terrígenos de erosión hasta deltas en la proximidad del mar o de grandes lagos, cita entre otros argumentos que dedujo de su estudio de la cuenca de Commentry, la presencia de fauna y el hallazgo de raíces en posición invertida. Fayol logró atraer a personas de gran prestigio científico como Lapparent y Renault; pero sus ideas fueron duramente combatidas, especialmente por Stevenson, autor de uno de los estudios más completos que se han hecho sobre esta cuestión, y en él señala que el agua no ejerce prácticamente una verdadera acción erosiva sobre la vegetación herbácea ó leñosa. El agua de los ríos, durante las crecidas solo erosiona cauces muy localizados, en los que deposita lodos; pero no arranca generalmente ni los troncos de los árboles ni la hierba de las praderas. Algunos ríos subesteparios, como el Mackenzie, que arrastran mayor número de árboles erosionan con ellos las riberas arrancando gran cantidad de materiales terrosos, y finalmente, o se detienen entrelazados formando grandes balsas o, salvando los deltas, llegan al mar o a grandes lagos en los que flotan a la deriva hasta que son destruídos por la intemperie y, ciertamente, en los dragados de mares y lagos no se ha encontrado nunca acumulaciones vegetales transportadas por las aguas.

En tiempos más modernos la tendencia general es a aceptar el origen autóctono de las acumulaciones vegetales, salvo casos muy particulares y circunscritos en que el origen alóctono es más evidente.

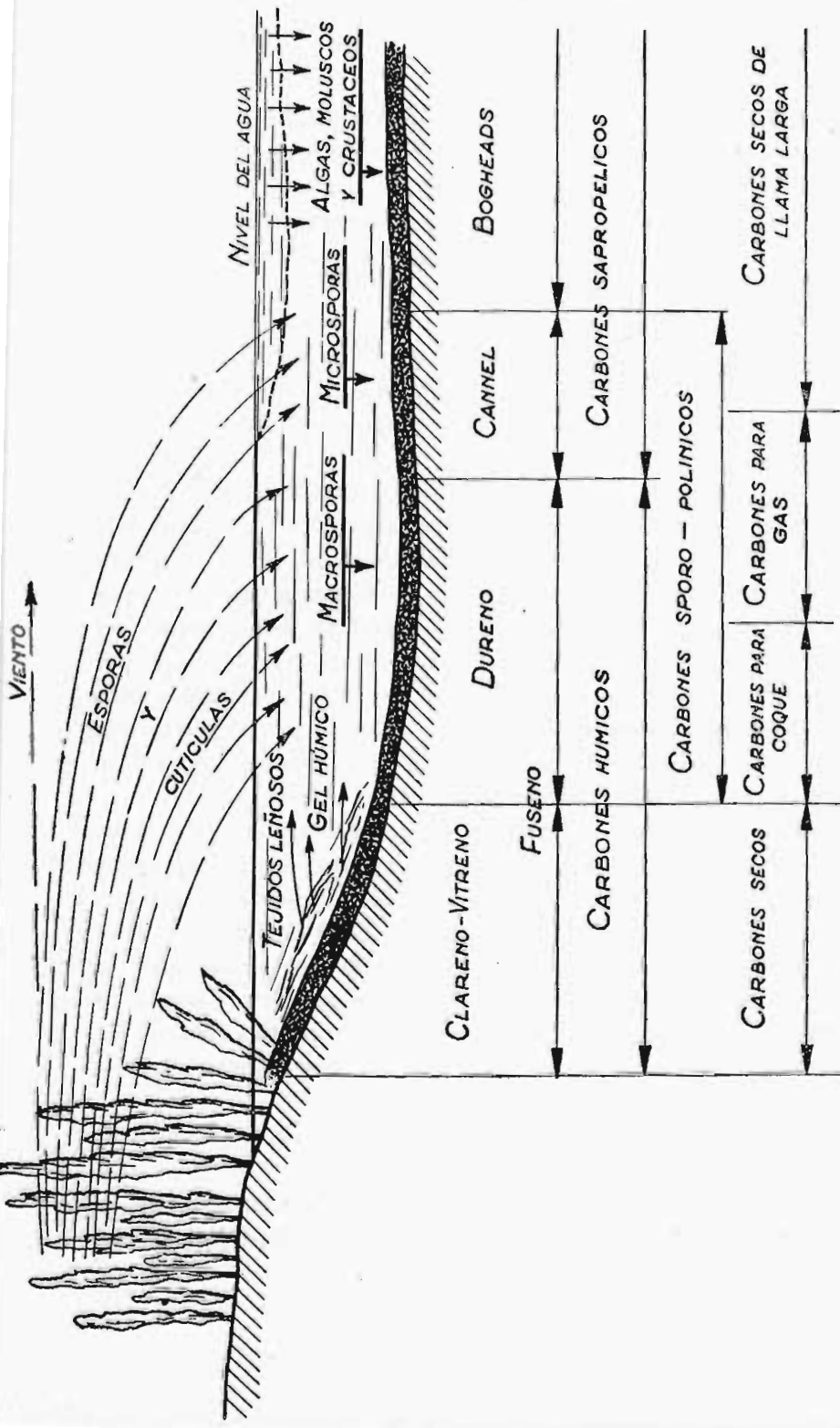
En 1928, Duparque¹⁹ observando las diferencias entre puntos horizontalmente distantes de una misma capa de hulla con respecto a sus caracteres petrográficos, propuso una nueva teoría que pudiera llamarse de la *semi-autoctonía* según la cual, en las formaciones límnicas, el suelo pantanoso de la orilla fija las raíces de las plantas superiores y formará, más tarde, el muro de areniscas y esquistos, con estigmarias; ya bajo el agua, las plantas hidrófilas y los gruesos residuos depositados con la arena formarán los esquistos de plantas fósiles.

Más al interior del lago, los depósitos terrígenos cesan y se sedimentan los residuos lignocelulósicos; más adentro, los de esporas y cutina; en la zona siguiente, las esporas solas, arrastradas muy lejos por el viento y aun por el agua formarán el *cannel* y, a mayor distancia aun, solamente la flora y fauna planctónica formarán el *boghead*, pero no es fácil encontrar en las cuencas hulleras una distribución tan sencilla (Fig. 14).

Estratigrafía del carbonífero

Evidentemente, tanto el carbón como las rocas que lo envuelven son de origen sedimentario. Estas rocas, blandas y plásticas en su origen, se han ido endureciendo y aparecen estratificadas en capas horizontales cuando no han sufrido plegamientos. Los animales que vivían en los mares o lagos de la zona carbonífera han dejado sus huellas, caparazones o esqueletos en la materia mineral sedimentada.

Los fósiles son los mejores indicadores de la *facies* de una roca y como las faunas y floras han experimentado muchas evoluciones, son buenos indicadores de cada época geológica; tanto mejores cuanto más rápida sea su evolución.



FORMACION SEMI-AUTOCTONA DE LAS HULLAS (LECOMTE)

- Fig 14 -



Los fósiles característicos de una determinada época permiten establecer sincronismos geológicos entre lugares muy alejados. Naturalmente, esta cronología no puede medirse en unidades absolutas de tiempo sino con referencia a la superposición normal de los elementos geológicos designados por el nombre de la localidad en que fueron determinados por primera vez.

Los estratos bastos, tales como los cantos rodados o los conglomerados, indican la situación de una ribera, un delta de terreno ó fuertes corrientes de agua; la aparición posterior de facies vegetales indicará que las aguas se han retirado ó reducido a marismas ó pantanos.

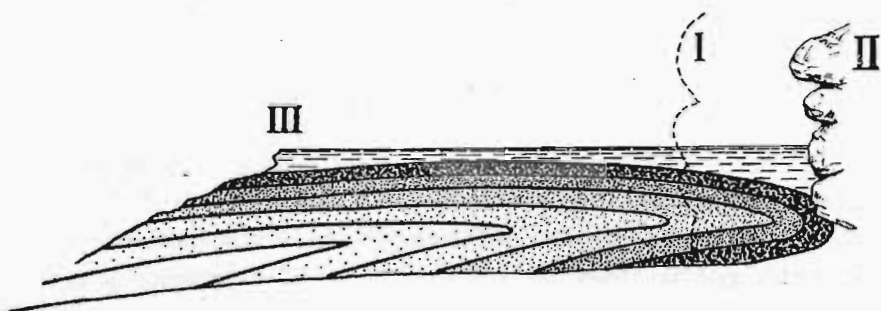
Los materiales arrancados por la acción erosiva del mar sobre las rocas del litoral experimentan una clasificación mecánica debida al enérgico y continuo movimiento de las aguas. En la inmediata proximidad a la costa se depositarán los trozos gruesos que, por el arrastre de las mareas presentarán superficies más o menos redondeadas, salvo que hayan quedado pronto inmovilizados por una suficiente profundidad en la región costera ó por una pronta conglomeración con otros materiales sedimentarios. A mayor distancia se depositarán las arenas; más lejos las arcillas, luego un barro calcáreo y, finalmente un lodo silicioso.

En un movimiento positivo ó de transgresión del mar, sobre un mismo lugar, se irán depositando capas de estos respectivos caracteres y, en orden contrario, cuando el movimiento del mar sea negativo ó de regresión, formándose en el conjunto de estos dos movimientos sucesivos un *ciclo sedimentario completo* (Fig. 15).

Frecuentemente, en vez de este ciclo completo y regular, se observan movimientos positivos de duración relativamente corta, interrumpidos por movimientos negativos, que originan alternancias de arenas y arcilla.

Separando los distintos ciclos, aparecen facies continentales y capas de carbón.

En los puntos correspondientes al límite de la transgresión, las distintas capas se interrumpirán, terminando en bisel. Estas trans-



DEPOSITOS DE TRANSGRESION Y REGRESION

- I- *Situación de la costa al iniciarse la transgresión.*
 II- *Situación de la costa al terminar la transgresión.*
 III- *Situación de la costa después de la regresión.*

— Fig. 15 —

gresiones marinas se señalan por la presencia de fósiles marinos en un lecho de sedimentos.

Cuando estas transgresiones tienen un carácter general, se pueden establecer correlaciones entre las capas de distintas cuencas, siempre que tengan fósiles característicos. Las transgresiones que ocurren simultáneamente en vastísimas extensiones reciben el nombre de *movimientos eustáticos*.

Toda cuenca carbonífera, cualquiera que sea su antigüedad, ha estado sometida a descensos por subsidencia ó por compresión entre dos macizos más antiguos y rígidos, los cuales tienden a elevarse. El plegamiento de una serie puede ser tan fuerte que parte de ella llegue a emerger y quedar sometida a las acciones erosivas

subaereas (lo que explica la formación de cantos rodados de carbón encontrados en algunos yacimientos) y sobre esta superficie erosionada pueden depositarse nuevos sedimentos en una siguiente transgresión.

La época geológica en que se han formado los grandes yacimientos carboníferos del mundo está situada en el final de la era primaria correspondiendo con las amplias modificaciones experimentadas por la superficie terrestre al fin del Paleozoico y comienzo del Mesozoico ó era secundaria.

Haug²⁰ ha propuesto el nombre de «Período antracólico» que comprende los sistemas Carbonífero y Permiano.

Al final del Devoniano, Europa estaba dividida en dos grandes sectores, uno continental y otro marítimo. El primero había emergido a consecuencia del movimiento Caledoniano y estaba cubierto de lagunas y de superficies desérticas. Al sur de Europa existía una vasta extensión marina²¹.

Comenzó entonces una larga serie de plegamientos llamados *Hercinianos* que se iniciaron con la *Fase Bretona* que dejó sus huellas en el macizo esquistosos renano, iniciándose un largo geosinclinal, al sur del continente nordatlántico, desde Cornwalles a Polonia, emergiendo una gran isla formada por Bretaña, los Vosgos, el Sarre, Turingia, y Bohemia²².

A esta emersión sucedió una gran transgresión marina que depositó grandes capas de caliza, principalmente en Inglaterra y en Bélgica formando el *Dinantiense*, rico en corales y en braquiópodos. Alrededor de la nueva gran isla se depositó un espeso complejo terrigeno continental llamado *Culm*.

Al final del Dinantiense, se produjo la segunda fase del plegamiento considerada como la más importante de los plegamientos hercinianos, llamada le *fase Sudete*. Aparecieron entonces nuevas tierras, que sometidas a un clima lluvioso fueron muy erosionadas por las aguas y sus arrastres rellenaron grandes fosas en formación, unas *parálicas* u oceánicas, con fósiles marinos y otras *limnicas* ó continentales, con fósiles terrestres ó de agua dulce. Ambas comienzan a presentar filones de carbón entre los sedimentos que forman el *Namuriense*.

Las tres principales fosas de esta época son: una que va del Devonshire al Ruhr; otra de Asturias a los Alpes cárnicos y la tercera al sur de España.

La tercera fase de los plegamientos, llamada Asturiana, corresponde al límite de separación entre el *Westfaliense* superior y el comienzo del *Estefaniense* y dejó definitivamente marcado el surco mediterráneo. En el *Westfaliense*, alcanzaron gran desarrollo las cuencas Frango-Belga, la de Westfalia y la cuenca central de Asturias, mientras que, en el *Estefaniense* alcanzaron su máximo desarrollo las del Sarre y del Gard.

El ilustre geólogo asturiano Patac²⁸ ha hecho un magnífico estudio comparativo de nuestra cuenca central con la holandesa que es una de las mejor estudiadas y conocidas, correspondiente, además, a la misma época geológica y de él deduce la siguiente posición estratigráfica de nuestras capas:

En el Namuriense medio (Grupo Epen), las «Calizas» y las «Generales».

En la primera mitad del *Westfaliense* A, (grupo Baarlo), el subtramo «San Antonio».

En la segunda mitad del *Westfaliense* A, (grupo Wilhelmina), el subtramo «María Luisa».

En la primera mitad del *Westfaliense* B, (grupo Hendrik), el subtramo «Sotón bajo» y la mitad del inferior de «Sotón alto».

En la segunda mitad del *Westfaliense* B (grupo Maurits), la mitad superior de «Sotón alto» y el subtramo «Entrerregueras».

En el *Westfaliense* C, (grupo Jabeek) el subtramo de «Sorriego».

Las cuencas de la vertiente meridional de la cordillera cantábrica son consideradas, en general, como contemporáneas de la cuenca central asturiana. Por el contrario, Patac, después de un detenido estudio de estas cuencas y de los afloramientos próximos a la Sierra de la Demanda, en la provincia de Burgos, explica todas estas formaciones como resultantes de una invasión de la submeseta septentrional de Castilla, de la submeseta meridional (desde Madrid a Castellón y Albacete) y el gran valle Bético (desde Alicante a Cádiz) por un mar Uraliense que penetró también

en Asturias por Villablino y Cangas del Narcea hasta Arnao; por Puertoventana hasta Teverga y por Liébana a la región oriental de Asturias. Toda esta gran superficie bañada por el llamado *mar de las fusulinas*, del hullero superior, puede encerrar, en opinión de Patac, extensísimos yacimientos hulleros, recubiertos por terrenos secundarios y terciarios; en la cual, las cuencas meridionales conocidas y explotadas serían simples afloramientos.

Recientemente, en 1946, Lombard,²⁴ recogiendo en un mapa de la Europa del Carbonífero superior datos de Haug, Furon, Gignoux y Demay, señala la existencia de ese mar postulado por Patac e indica formaciones del Ottweiler litoral; es decir, uralienses, a lo largo del litoral cantábrico y en la vertiente occidental pirenaica.

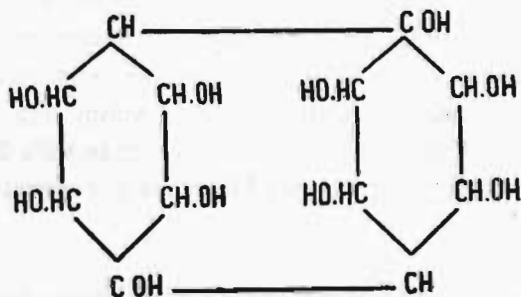
Mencionaremos, por último, dos horizontes lignitíferos bien definidos: Los *lignitos cretáceos* de Utrillas (Teruel), de Figols (Barcelona) de Las Rozas (Santander), etc. y los *lignitos oligocenos* de los valles del Ebro y del Segre, de Sierra de Espuña (Murcia), de Valencia y Baleares, de Puentes de García Rodríguez (Coruña), etc.

Carbonización de las materias vegetales

Las plantas están formadas, fundamentalmente, por *celulosa* y *lignina*, contienen, además, albuminoides, ceras, resinas, cutina y otros productos de menor importancia en la génesis del carbón.

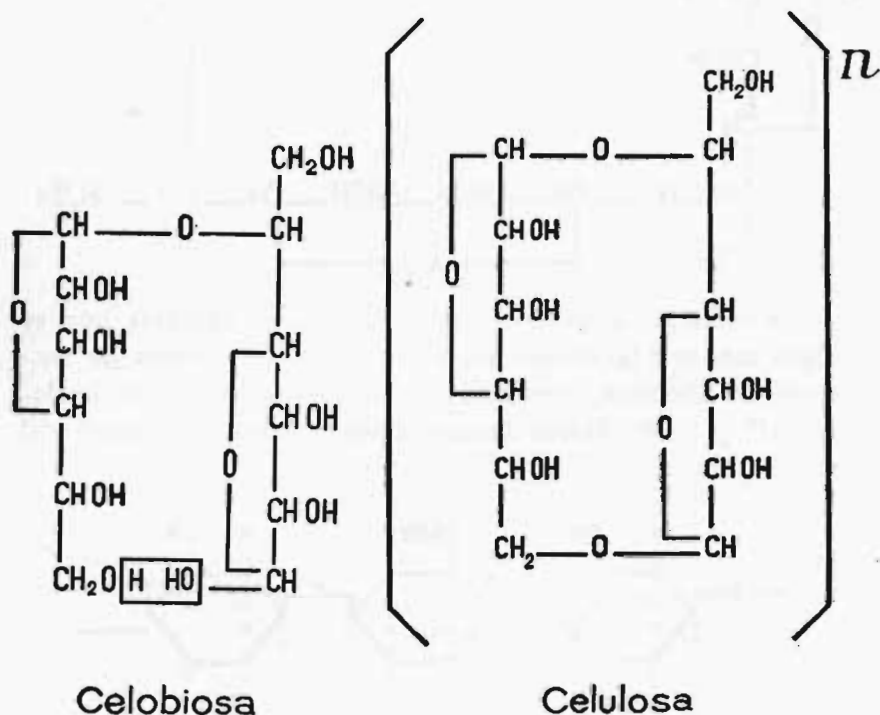
Las *celulosas*, que forman la estructura básica de los vegetales, están constituidas por hidratos de carbono de fórmula $n(C_6H_{10}O_5)$ con una composición elemental de 44,4 por ciento de C, 6,2 por ciento de H y 49,4 por ciento de O.

Según Cross y Bevan²⁵, de los cinco átomos de oxígeno, cuatro están formando grupos OH y la fórmula es



pero esta fórmula no explica ciertas propiedades de la celulosa, como la frecuente formación de furfural en las transformaciones químicas de la celulosa, lo que indica la presencia en ella de grupos furánicos y la formación, por hidrólisis, de celobiosa la cual, a su vez, se desdobla en glucosa.

Según Karrer²⁶, la celulosa sería el resultado de la polimerización de un anhídrido de celobiosa:

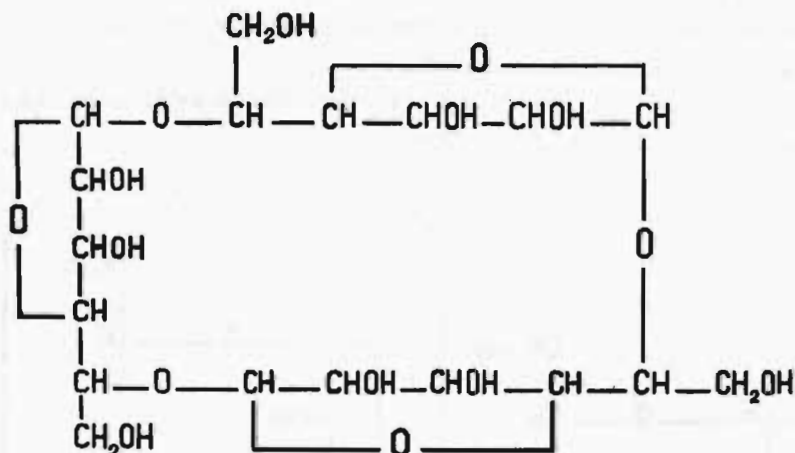


en que (n) es indeterminado.

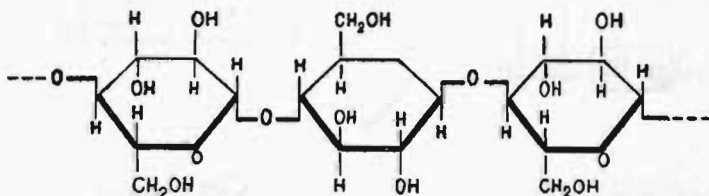
Por hidrólisis, la celulosa se transforma en celobiosa (con un rendimiento del 50 al 70 por ciento) y en glucosa. Esto ha hecho suponer a Karrer que se forman cantidades, aproximadamente iguales de celobiosa y de maltosa, pero que esta última se hidroliza inmediatamente en glucosa.

El hecho de que el único disacárido encontrado en los pro-

ductos de hidrólisis de la celulosa es la celobiosa ha inducido a Irvine²⁷ a atribuir a la celulosa la siguiente fórmula:



Sin embargo, la fórmula más corrientemente admitida hoy es la que supone a la celulosa formada por una larga cadena de moléculas de celobiosa, constituidas según el modelo especial de Harworth²⁸ y unidas glucosídicamente por el átomo de oxígeno del cuarto carbono.



Esta última fórmula, además de presentar en cada grupo de hexosa tres oxhidrilos eterificables, concuerda con los poderes rotatorios de los derivados de la celulosa, que son del mismo orden que el de los B-glucósidos y también los diagramas de difracción de rayos X corresponden a los de un cristal que gira alrededor de un eje, con una dimensión de malla de 10,3 Å a lo largo de la común orientación de los mismos (que es la de la fibra), prácticamente igual a la dimensión de malla de la celobiosa.

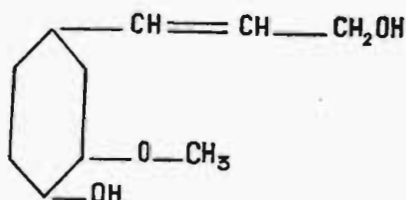
Además, Zechmeister y Toth²⁹ han logrado extraer fragmentos de cuatro y hasta de seis grupos de celohexosa por acetólisis de la celulosa con una mezcla de ácido sulfúrico y anhídrido acético.

Las *ligninas* han sido separadas de la madera por Willstätter³⁰ y sus colaboradores solubilizando las celulosas y gomas que la acompañan por medio de una hidrólisis rápida y la industria lo hace, actualmente, por tratamientos con sosa o con lejía bisulfítica; pero el producto obtenido no está formado por lignina pura, sino por una mezcla de lignina y gomas, lo que no ha permitido aún dilucidar completamente su constitución, siendo muy importantes, a este respecto, los trabajos de Klason³¹.

Se distinguen dos grupos de ligninas: las α y las β .

Las primeras se encuentran en los vegetales en la proporción aproximada de dos a uno, respecto de las segundas. Aquellas se caracterizan porque sus disoluciones son precipitadas por el cloruro cálcico, en forma de lignosulfonato cálcico, y tienen una composición elemental $C_{22}H_{22}O_7$, conteniendo grupos metoxilo ($-O-CH_3$) y acroleínico ($-CH=CH-CHO$), mientras que las del grupo β , de fórmula bruta ($C_{19}H_{18}O_9$) no precipitan por el cloruro cálcico, contienen un grupo carboxilo y carecen de radical acroleínico. Ambas tienen un carácter aromático demostrado por sus derivados.

Es decir, que la substancia básica original de las ligninas puede ser el alcohol coniferílico o *aglicona*



que existe en estado de glucósido, la *coniferina*, en el cambium de las Coníferas; cuerpo cinámico químicamente relacionado con la esencia de canela.

Es fácil pasar de la aglicona a la vanillina, al guayacol, a la pi-

rocatequina y al ácido pirocatéquico, productos todos que, con el alcohol metílico y el ácido acético se encuentran siempre en la pirolysis de la madera.

Se ha tratado de explicar la formación de la lignina por una deshidratación de la celulosa; transformación que avanzaría con el crecimiento de las plantas; pero ésto aun no ha podido demostrarse ni siquiera razonarse con sólidos fundamentos y, en tanto que no se llegue a un conocimiento más perfecto de la constitución química de las ligninas, es aventurado determinar su origen.

Los *albuminoides* de los vegetales existen en el protoplasma y, especialmente, en el núcleo de las células vivas. Entre las sustancias nitrogenadas de las plantas, merece particular mención la clorofila que contiene núcleos, derivados del pirrol, unidos al magnesio.

La *cerina*, la *suberina* y la *cutina* son sustancias de protección que recubren las partes externas de los vegetales, impermeabilizándolas y su constitución química es parecida a la de las grasas. Mientras que en la constitución de la cutina toman parte una molécula de ácido estearocútico, $C_{28}H_{48}O_4$ y cinco moléculas de ácido oleocútico $C_{18}H_{34}O_2$, por saponificación de la cerina y de la suberina se obtienen ácidos esteárico y felónico $C_{23}H_{43}O_2$; pero, como ha señalado Duparque⁸², la cutinización consiste en una verdadera transformación de la membrana celulósica; en cambio, la suberización es una impregnación de dicha membrana por cerina y suberina.

Las *esencias* son productos de secreción, que pueden permanecer en el interior de las células secretoras o acumularse entre ellas. Están formadas por hidrocarburos de la serie grasa o terpénicos. Por oxidación, forman las *resinas* y la mezcla de éstas con esencias y un ácido libre (generalmente el benzóico o el cinámico) forman los *bálsamos*.

Las *gomas* y los *mucilagos* son cuerpos de carácter péptico, que resultan de la gelificación de las membranas celulósicas y tienen una composición análoga a la de las dextrinas.

La turbificación (Fase bioquímica de White³³)

Ya en la segunda mitad del siglo XIX, quedó demostrado que ciertas bacterias atacan a la celulosa y partes blandas de los vegetales.

Al comienzo del siglo actual, Renault encontró en las turberas *Micrococcus* y *Streptococcus* capaces de actuar a profundidades hasta de unos diez metros, formando un gel o sustancia matriz de todos los carbones, observando que el grado de alcalinidad del agua puede influir en la máxima profundidad de acción de las bacterias.

En casi todos los lechos de lignito se ha encontrado el *Bacillus fluorescens* y hasta en capas de hulla, en profundidades de 400 a 750 metros, se hallaron bacilos de los géneros *subtilis* y *mesentericus*³⁴.

Los estudios más interesantes acerca de la intervención de los micro-organismos en la formación del carbón son los de Waksman y de Fischer y Liesk, del Instituto del Carbón, de Mülheim, según los cuales, en los pantanos pueden distinguirse tres zonas: una superior, expuesta al aire, que contiene numerosos hongos y bacterias aerobios; una zona intermedia, poco sumergida, en la que ya no hay hongos y disminuye el número de aerobios y otra más profunda, en la que existen bacterias anaerobias. Los hongos y las bacterias aerobias destruyen la celulosa de la pared celular y solamente las anaerobias atacan a la lignina.

El orden en que se descomponen los elementos vegetales es el siguiente: 1—protoplasma; 2—clorofila; 3—aceites; 4—celulos; 5—epidermis; 6—películas de semillas; 7—pigmentos; 8—cutículas; 9—esporas y exina de polen; 10—ceras; 11—resinas. Los tres primeros desaparecen rápidamente y los cuatros últimos son muy resistentes permaneciendo después de la completa eliminación de los anteriores³⁵.

En estas descomposiciones bacterianas, además de metano, anhídrido carbónico y agua, se forman ácidos fórmico, acético, láctico, oxálico, etc. que se disuelven en las aguas, y un producto limoso, llamado *humus*, formado por compuestos complejos, también ácidos, conocidos en conjunto como *ácidos húmicos*.

La acidez, así creada, limita la actividad de las bacterias.

En las aguas completamente estancadas, la limitación del oxígeno disuelto a la capa más superficial y la acumulación de acidez permitirán que hasta la celulosa quede inalterada y el carbón, así formado, sería rico en vitreno. En cambio, en las aguas más aireadas y renovadas, la fermentación sería muy activa y solo la resistirían las esporas, cutículas, resinas, etc., que originarían carbones ricos en dureño y aun cancell.

Esto permite comprender por qué no todos los acumulos de plantas forman turberas; por ejemplo, en algunas selvas tropicales donde quizá el factor temperatura active excesivamente la acción de las bacterias o en lugares en que la corriente del agua no permite concentrar la suficiente acidez frenadora.

Tiene extraordinario interés, a este respecto, la hipótesis de Taylor³⁶ según la cual la transformación de la turba en lignito y hulla o su permanencia en tal estado de turba depende de que esté o no recubierta por lechos minerales, y de la naturaleza de esos lechos. Si es arcilloso (silicatos de cal y de aluminio) puede producir una desacidificación y como aún conserva una cierta permeabilidad a los gases proseguirá una lenta actividad de los aerobios y la turba se transformaría en lignito. Si más tarde se produce en tal techo un cambio de base calcio-sodio, al contacto con impregnaciones salinas, análogo al bien conocido de las permutitas, el medio puede llegar a ser alcalino y el silicato sódico formado impermeabilizaría el techo a los gases, interrumpiéndose la acción bacteriana aerobia. En tales condiciones, una fermentación exclusivamente anaerobia conduciría a la formación de las hullas. Un techo formado por complejos sodio-aluminio-silice impediría el escape de metano y de nitrógeno por su impermeabilidad a los gases; pero no del anhídrido carbónico que sería absorbido por el hidróxido sódico resultante de una hidrólisis del complejo.

Experimentalmente, comprobó que sustancias orgánicas colocadas sobre una capa de arena y cubiertas por un complejo sodio-aluminio-silice, sufrieron una transformación semejante a la de la carbonización.

En cinco capas de carbón inglés, encontró que mientras el mu-

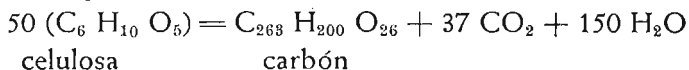
ro tenía un pH variable entre 5,5 y 8,5, en el techo era más uniforme y comprendido entre 8,2 y 9,0.

Según, Waksman, gran parte del nitrógeno y del azufre de los carbones sería debido a los albuminoides de las propias bacterias.

Se ha discutido mucho acerca de qué componentes vegetales han contribuido preponderantemente a la formación de los carbones.

Teoría de la celulosa

Considerando que la celulosa es el más abundante de los componentes vegetales, Bergius³⁷ supuso y trató de demostrar que en esta substancia residía fundamentalmente el origen de los carbones. Para ello, sometió celulosa a una temperatura de 250 a 300° y a una elevada presión, para suplir, por este medio, la prolongada acción del tiempo, y logró obtener una substancia parecida al carbón; una especie de carbón artificial. Según este conocido y famoso investigador alemán, la transformación de la celulosa en carbón se formaría por la ecuación:



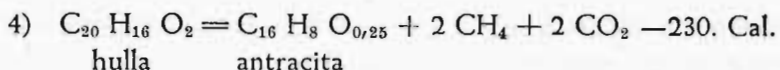
y calculó que, en las condiciones naturales, el tiempo necesario para que esa transformación se efectuase sería

7,8. 10⁶ años

Como en los ensayos de compresión de la turba se desprende metano, y al comprimir celulosa lo que se desprende es CO₂, Bergius dedujo que el metano proviene de componentes de la turba que no proceden de la celulosa.

Erasmus interpretó los resultados de Bergius como posibilidad de una transformación escalonada celulosa-antracita en la forma siguiente:

- 1) $(\text{C}_{12} \text{H}_{20} \text{O}_{10})_2 + \text{O}_2 = \text{C}_{24} \text{H}_{18} \text{O}_{11} + 11 \text{H}_2\text{O} + 310 \text{Cal.}$
celulosa ácido húmico
- 2) $\text{C}_{24} \text{H}_{18} \text{O}_{11} = \text{C}_{22} \text{H}_{16} \text{O}_6 + 2 \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 10 \text{Cal.}$
ácido húmico lignito
- 3) $\text{C}_{22} \text{H}_{16} \text{O}_6 = \text{C}_{20} \text{H}_{16} \text{O}_2 + 2 \text{CO}_2 + 10 \text{Cal.}$
lignito hulla



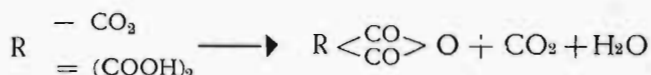
También Wheeler y Jones compartieron la opinión de Bergius fundándose en la escasa proporción de lignina en la madera, aunque no hay razón para suponer que en la flora del carbonífero ocurriese lo mismo.

Teoría de la lignina

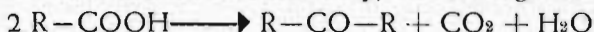
A medida que se fué conociendo mejor la composición química de los carbones, así como las de la celulosa y la lignina, la teoría de Bergius tropezaba, de día en día, con nuevas dificultades.

Fuchs³⁸ y Marcusson³⁹ encontraron que los lignitos están formados fundamentalmente por ácidos húmicos y humatos.

Los ácidos húmicos fueron identificados por Marcusson⁴⁰ como ácidos policarboxílicos unidos, según Waksman, a grupos metoxilo y acetilo y su transformación en sustancias húmicas insolubles consiste en una descarboxilación que daría anhídridos pirohúmicos y cetonas, con desprendimiento de CO_2 y de H_2O . En una primera reacción



quedaría como residuo sólido, el ácido pirohúmico, o sea el anhídrido de un ácido menos carboxilado y, en una segunda reacción,



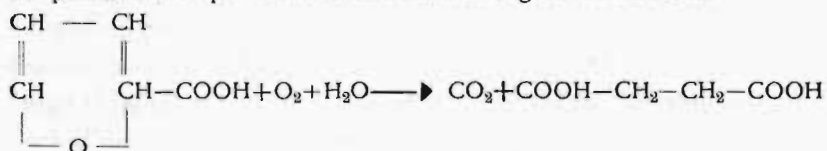
el residuo sería una cetona húmica. Estos productos y los resultantes de la transformación de ceras y resinas serían los constituyentes fundamentales del lignito.

Por posterior desprendimiento de CO_2 y CH_4 , estas sustancias húmicas acaban por hacerse insolubles hasta en los álcalis fundidos, estado en que se encuentran formando hasta un 90 por 100 en las hullas.

Fischer y sus colaboradores, tratando lignito con oxígeno, a presión y a 200° identificaron los ácidos benzóico, isoftálico y pirocatéquico, junto con ácidos fórmico y acético, en el líquido obtenido, el cual daba un precipitado pardo de ácido húmico, al ser tratado por ClH , demostrando, una vez más, el carácter aromáti-

co de los componentes del lignito. La lignina se comporta de un modo análogo⁴¹; pero la celulosa, tratada de la misma manera, solo da compuestos furánicos, que no se encuentran en el carbón.

En realidad, como ha señalado Marcusson, la ausencia de grupos furánicos, en los productos de oxidación, no demuestra que no existiesen en la materia tratada, ya que el grupo furánico ha podido romperse por la oxidación, como ocurre en el caso del ácido piromúxico que da ácido succínico según la ecuación



Por destilación seca, tanto la celulosa como la lignina, dan productos fenólicos; pero, en el caso de la lignina, la proporción es siete ú ocho veces mayor, revelando su carácter aromático, demostrado también por Troppsch y Schellenberg⁴² al identificar la hexadinitrorresorcina y el trinitrobenceno en la lignina nitrada.

Fischer y Schrader⁴³ dedujeron de su estudio químico de los carbones, de la celulosa y de la lignina, que la celulosa se descompone fácilmente en CO_2 y en H_2O por la acción de los microorganismos y que no juega gran papel en la formación del carbón, formulando entonces su teoría de la lignina, como origen de los compuestos húmicos, en tanto que las ceras y resinas se transforman en betún.

Esta teoría, hoy generalmente aceptada, tuvo pronto numerosos adeptos.

Del estudio de las propiedades ópticas de la pared celular, en plantas, lignitos y carbones bituminosos, dedujo Yasui⁴⁴ que la celulosa desaparece pronto en el proceso de la carbonización, ya que su doble refracción característica disminuye a medida que dicho proceso avanza.

La persistencia de la lignina y la desaparición de la celulosa, por transformación en oxixelulosa y en pectina, fué comprobada también por Marcusson.

Waksman,⁴⁵ insistiendo en sus anteriores ideas acerca de la

contribución de la substancia propia de las bacterias, formada a expensas de la celulosa que les sirve de alimento, considera, para los compuestos húmicos, un doble origen: De una parte, procederían de los cuerpos resistentes a la fermentación (lignina, cutículas, etc.,) y de otra parte serían originados por la substancia celular de los micro-organismos.

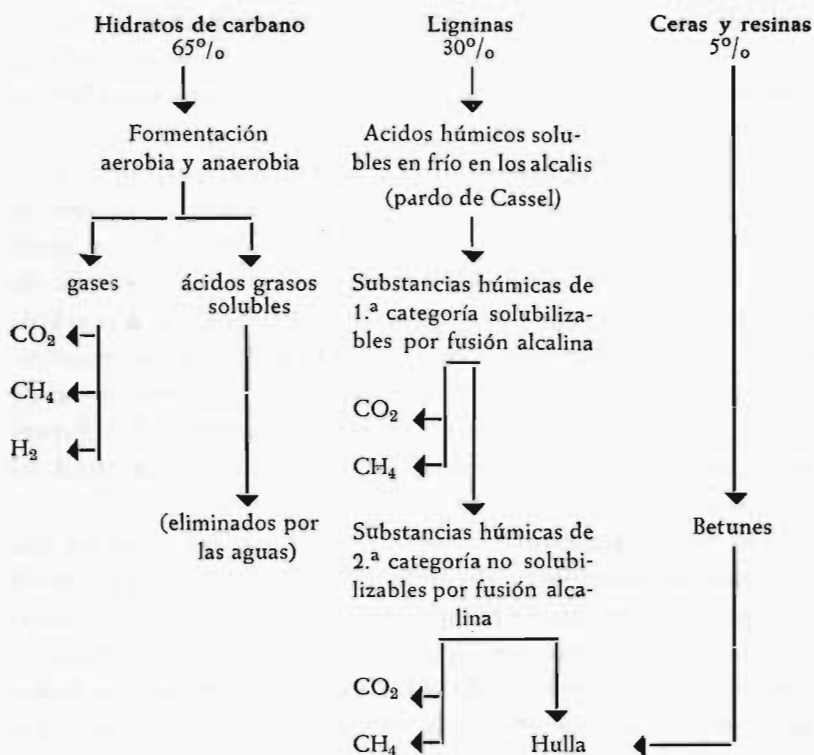
Mertens⁴⁶, razonando a la luz de la teoría de la lignina, deduce que las plantas que dieron origen a la hulla eran de tipo arbóreo, opinión compartida por Potonié y por la mayoría de los geólogos.

Wilstätter y Kalb⁴⁷ ensayaron la fuerte acción reductora del ácido iodhídrico y del fósforo sobre los azúcares y sobre la lignina, encontrando en ambos casos, que se había formado un hidrocarburo del tipo del perhidro—9—10—benzofenantreno, lo que movió a Fischer y Schrader a modificar su teoría, en el sentido de admitir una posible intervención de los hidratos de carbono en la formación de los ácidos húmicos.

Más recientemente, Berl⁴⁸ y ⁴⁹ y sus colaboradores dedujeron de ensayos de compresión, a 200—350.^o, de diversas substancias, en presencia de álcalis, que tanto la celulosa como la lignina han contribuído a la formación del carbón, predominando la primera en los carbones coquizables y la segunda en los que no coquizan. Aunque esta conclusión es bastante objetable, revela una tendencia a no excluir, con carácter tan absoluto, a la celulosa en la formación de los carbones.

Mertens y Massinon⁵⁰ han ordenado en el siguiente cuadro un resumen del proceso de formación de la hulla, según la teoría de Fischer y Schrader:

Substancias vegetales



Otras teorías

Aun admitiendo el papel predominante de la lignina en la génesis de las turbas y lignitos y que la contribución de la celulosa, a este respecto, no debe ser excluida de un modo absoluto, es evidente que otros componentes de la materia vegetal han tenido también su participación y, por cierto, no insignificante.

Duparque⁵¹, después de numerosos y muy interesantes estudios micro-gráficos de diversos carbones, principalmente de la cuenca del Norte de Francia, considera dos categorías distintas de carbones: Una de ellas, constituida por las hullas para coque y las hullas secas o antracitosas, así como los lignitos y las turbas, cuyo origen sería la lignina, pero en el cual la celulosa ha debido desem-

peñar un papel no menos importante, ha sido designada con el nombre de carbones *ligno-celulósicos*, en los que predominan el clareno y el vitreno y en los cuales, su distinto comportamiento químico puede ser debido a la influencia de las acciones secundarias (temperatura, presión, etc.), a las que nos referiremos más adelante y con mayor detenimiento.

La otra categoría, constituida por las hullas grasas propiamente dichas, para gas, y el cannel, ha sido designada con el nombre de *carbones de cutina* porque, en su origen, ha desempeñado un papel primordial la cutina, siendo verdaderamente notable que capas de un espesor del orden de metro y medio estén formadas por el acúmulo de innumerables esporas y cutículas de tamaño microscópico, lo que obliga a considerar, o bien que las verdaderas lluvias de esporas del período carbonífero no eran comparables a la dispersión actual de esas células sexuales, o bien la enorme magnitud del factor tiempo en la formación del depósito.

El hecho de que estos carbones, ricos en dureno, sean los que dan mayor proporción de alquitrán, en la destilación, ha llevado a Duparque a la conclusión de que no es en la lignina, ni en la celulosa, donde ha de buscarse el origen principal de los productos aromáticos que se extraen de la hulla, por destilación, sino en los compuestos de tipo semejante a las grasas, como la cutina y las ceras.

También Stadnikoff⁶² admite dos modalidades distintas en la formación de las hullas: Una, a partir de los vegetales ricos en lignina, según el proceso indicado por Fischer y Schrader, y otra, por la cual los ácidos grasos de las esporas, cutículas y demás residuos microscópicos de las plantas se polimerizan y deshidratan transformándose en hidrocarburos cíclicos, formando carbones del tipo de los bogheads, cuyo alquitrán de baja temperatura es pobre en fenoles, en resinas y en asfaltenos. Así, pues, las ceras y las resinas desempeñarían, en la génesis de los carbones, un papel bastante más importante del que permite prever la teoría de la lignina.

Condiciones que han influido en la formación de Turbas y lignitos

a) *Condiciones climáticas*

Existe general unanimidad en admitir que el clima del carbonífero fué uniforme en grandes áreas de la superficie terrestre, como lo demuestra el hecho de que las mismas especies de plantas carboníferas se encuentren, en ambos hemisferios, desde los trópicos a las regiones polares y posiblemente esta condición continuó en el Jurásico y en el Cretáceo, con algunas interrupciones.

Puede explicarse ésto por la gran cantidad de anhídrido carbónico que existía en el aire, el cual, como es sabido, posee dos bandas de absorción bastante importantes. También pudo contribuir a esta uniformidad la distribución de mares y continentes, muy distinta de la actual, que permitiría corrientes oceánicas capaces de templar las zonas polares.

Tampoco ofrece duda la fuerte humedad de la atmósfera en este período y la poca o ninguna diferenciación de las estaciones, demostrada por la falta de anillos de crecimiento en los troncos.

El gran desarrollo de hojas y frondes y las grandes dimensiones celulares, con delgadas paredes, indican un rápido crecimiento, correspondiente a un clima tropical o subtropical, aunque también en climas templados se encuentran, actualmente, bosques de lujuriosa vegetación.

b) *Exposición, previa al enterramiento*

La madera expuesta a la intemperie se pudre y, por efecto de esa putrefacción, el contenido en carbono se eleva. Así, por ejemplo, la madera sana de roble tiene 22 por ciento de carbono; mientras que la podrida alcanza un 31 por ciento. Según White⁵³, el fuseno se originaría por una putrefacción por encima del nivel del agua de la turbera.

c) *El factor tiempo*

Todas las transformaciones que hemos mencionado son suma-

mente lentas y, en general, a una mayor antigüedad corresponde un mayor grado de carbonización, salvo que otras circunstancias hayan acelerado esas transformaciones sustituyendo el efecto del tiempo

Condiciones que han influido en la formación de hullas y antracitas

a) *El factor temperatura*

Parece demostrado, sin ninguna duda, que una elevación de temperatura como la producida por la proximidad de lacolitos, batolitos o cualquier clase de infiltración ígnea, ocasiona la antracitación de los carbones sometidos a dicha elevación local de temperatura.

Esto se ha comprobado principalmente en Colorado, Alaska y Nuevo Méjico⁵⁴.

Dapples⁵⁵ ha encontrado en carbones del cretáceo y aun terciarios, que han sufrido metamorfismos por rocas ígneas, toda la serie de carbones hasta la antracita y el coque. Basándose en datos de Larsen referentes a una intrusión análoga y de Lowerin sobre transmisión del calor, calcula que las temperaturas alcanzadas fueron 300-350° en la zona antracitada y 460-500° en la zona coquizada.

En los carbones del Colorado, encontró ceras de p. f. 193-210° en las capas de hulla bituminosa; pero no en las del mismo sector que se antracitaron por intrusiones ígneas.

También White señala la existencia de resinas en hullas y en lignitos y su ausencia en las antracitas porque al llegar a esta última fase de la carbonización, las resinas se oscurecen, contraen y fracturan, hasta convertirse en residuo oscuro, esponjoso o granular que, por contracción, se reducen a delgadas escamas negras, que fácilmente se pulverizan.

De las temperaturas necesarias para alcanzar un determinado grado de carbonización, calculadas por diversos autores, con la imprecisión y discrepancias propias de esta clase de cálculos, pue-

de deducirse que, para las hullas y lignitos, es del mismo orden aproximadamente, estando comprendida entre 160° y 350°, mientras que, para las antracitas, es de 350° a 600°, y para el coque, de 600° a 900°.

Prescindiendo del caso excepcional de las intrusiones ígneas, a la creación de estas temperaturas pueden contribuir, por una parte, el grado geotérmico que puede estimarse, por término medio, en un grado por cada 33 m. de profundidad, y por otra parte, los efectos dinámicos que a continuación describiremos.

b) *El factor presión*

El carbón y los demás estratos sedimentarios que lo recubren están sometidos a la continua presión producida por el peso de las capas superiores y esta *presión estática* será, por consiguiente, tanto mayor cuanto más profundo y, generalmente, más antiguo sea el estrato que la soporta.

Ya hemos visto la influencia que la temperatura puede ejercer acelerando las reacciones. Es sabido que, en las reacciones químicas corrientes, cada diez grados más de temperatura suponen, aproximadamente, una duplicación de la velocidad de reacción.

En las fases finales del proceso de la carbonización, caracterizadas por fenómenos de polimerización, que conducen a la formación de productos, cada vez más densos, no puede menos de ejercer una marcada influencia la presión a que estén sometidos.

Los autores que se ocupan de estas cuestiones se refieren con frecuencia a una *elevación de temperatura por efecto de la presión*. Esto sería más correcto si en vez de presión dijeran *compresión*.

En efecto, una fuerza no puede desarrollar calor en tanto que no realice un trabajo; ahora bien, como la evolución de la carbonización supone un aumento de la densidad, existe realmente una compresión y si el cuerpo que se comprime es plástico y poco elástico como el carbón, la energía disipada en forma de calor puede ser lo bastante considerable para producir una mayor o menor elevación de temperatura.

Los gases que se desprenden, hasta en las últimas fases de la carbonización, pueden absorber y amortiguar los efectos de compresión disminuyendo el desprendimiento de calor, y quizá esto pueda servir de explicación a la observación de Campbell, de que la antracitación es favorecida por el carácter poroso de las rocas que rodean al carbón, siendo más favorables a la formación de antracita las areniscas gruesas que las pizarras.

La progresión de la carbonización bajo la acción aislada, o más probablemente combinada, de la temperatura y de la presión es tan evidente que ha permitido a Hilt⁵⁶ enunciar, en 1873, el principio conocido como *Ley de Hilt* según el cual, el contenido en carbono fijo aumenta progresivamente con la profundidad de enterramiento.

Esta ley ha sido confirmada por multitud de observaciones en distintos países y una de las más curiosas es la referente a unos lignitos encontrados en capas del Carbonífero, de la región occidental de Australia, en que, por faltar algunas zonas del Permo-carbonífero, no estuvieron sometidas a tan intensas presiones como los demás carbones, del mismo período y de la misma región, que se transformaron en hullas o en antracitas.

Van Waterschoot calcula la disminución de las materias volátiles con la profundidad en 1,6 por ciento, por cada 100 metros.

Se han señalado también no pocas excepciones a la ley de Hilt, entre las que citaremos la «turba» pleistocénica de Honerdingen que, por su aspecto y composición, es un lignito y los «lignitos» existentes en la base de las hullas de Tula, Moscú.

Petraschek y Wilser⁵⁷ creen que la ley de Hilt no se cumple para los yacimientos más recientes, posteriores al carbonífero; pero, en cambio, se aplica por igual a los yacimientos parállicos que a los límnicos.

La ley de Hilt resulta a todas luces insuficiente para explicar la disminución progresiva en materias volátiles, en sentido horizontal, de la serie de capas de toda una cuenca, como la señalada por Legraye⁵⁸, en dirección suroeste a nordeste, en la cuenca de Lieja; en dirección oeste a este, en una capa de carbón bituminoso de Pensilvania, estudiada por Stadnichenko⁵⁹, etc. No obstante, en to-

dos estos casos, la ley de Hilt se cumple en sentido vertical.

Estos casos últimamente citados parecen, a primera vista, una confirmación de la hipótesis de clasificación en sentido horizontal, de los distintos componentes vegetales que han dado origen a carbones de diferente calidad; pero ni es probable que esto sucediera en una extensión tan considerable, ni tendrían explicación esas mismas variaciones en sentido vertical, ni el examen microscópico ha revelado diferencia alguna en la primitiva materia vegetal de cada capa, en toda su extensión. Además, en dirección normal a la de desvolatilización, no se han encontrado variaciones apreciables.

En todos estos casos, el estudio tectónico de la cuenca revela que ésta ha estado sometida a esfuerzos de compresión horizontales en dirección precisamente perpendicular a las líneas *isoantracíticas* (o *isovol*, como las ha llamado White) que explican, por el efecto de la compresión, las diferencias encontradas. Merece citarse, a este respecto, el magnífico estudio hecho por Legraye de las cuencas de Lieja.

También esta hipótesis tiene sus escollos. En los plegamientos hercinianos de Lievin (Paso de Calais) las partes más elevadas de los plegamientos tienen igual o menor contenido en materias volátiles que las partes más bajas, a pesar de que el esfuerzo ha debido ser mayor en estas últimas y en contra de la ley de Hilt; pero esta objeción es fácil de salvar. Los plegamientos hercinianos no han tenido intervención apreciable en la antracitación de los carbones; puede decirse que han llegado demasiado tarde, cuando ya las capas de carbón poseían una tupida red de fisuras de contracción que las hacían frágiles y fácilmente dislocables y no es la fricción de superficies de rotura sino la fricción molecular de un cuerpo homogéneo y plástico, que aguanta los efectos de compresión, lo que puede ocasionar una elevación de temperatura.

No es en los aparatosos pliegues hercinianos sino en los esfuerzos tangenciales, anteriores a ellos y a veces bien resistidos, entre robustos macizos de más antigua formación, donde encontraremos un factor, si no el más importante de la antracitación de las hullas.

BIBLIOGRAFIA

- (1)—C. BERTHELOT—«La Tourbe»—Dunod, París (1943).
- (2)—J. J. STEVENSON—Proc. Am. Phil. Soc.—Vol. 50—p. 1-116 y 519-643 (1911).
- (3)—C. W. von GUMBEL—Sitzungs d. Math. Phys. Klasse k. b. Acad. Wiss.—Vol. 13—p. 113 (1883).
- (4)—F. von BEROLDINGEN—«Beobachtungen, Zweifel und Fragen, die Mineralogie überhaupt und insbesondere ein natürliches Mineral System betreffend»—Hannover (1778) p. 131.
- (5)—DELUC—J. Physique—Vol. 38—p. 174 (1798).
- (6)—J. LE CONTE—«Lectures on Coal»—Ann. Rept. Smithsonian Inst. (1858) p. 131.
- (7)—C. S. FOX—Fuel—Vol. 9—p. 548-59 (1930).
- (8)—H. D. ROGERS—«An Inquiry into the origin of the Appalachian Coal Strata, Bituminous and Anthracite»—Repts. of Amer. Assoc. of Geologists and Naturalists—Boston (1843).
- (9)—E. MAMMATT—«Coal Field of Ashby de la Zouche»—W. Hextall and G. Lawford—London (1834) p. 71-4.
- (10)—R. E. GRIM—Bull. Am. Ceramic Soc.—Vol. 14—p. 113-19, 129-34 y 170-6 (1935).
- (11)—H. MIETZSCH—«Geologie der Kohlenlager» (1875).
- (12)—H. POTONIE—Jarb. d. k. Preuss. Geol. Landesanstalt (1895).
- (13)—J. B. JUKES—«The South Staffordshire Coal Field» Memoirs Geol. Survey of Great Britain, 2.^a ed., Londres (1895).
- (14)—J. HALL—«Paleontology»—Vol. III—Nueva York (1859).
- (15)—W. S. GRESLEY—Am. Geologist—Vol. 14—p. 356-65 (1894).
- (16)—J. H. HUTTON—«Theory of the Earth with Proofs and Illustrations»—Codell Jr. & Davies—Londres (1795)—Vol. I—p. 565-86.
- (17)—GRAND'EURY—Ann. des Mines—Ser. 8-T. 1. (1882).
- (18)—H. FAYOL—Bull. Soc. Géol. de France—(3)—Vol. 16—p. 968-78 (1887).
- (19)—A. DUPARQUE—Bull. Soc. Géol. de France—Ser. 4—Vol. 28—p. 455 (1928).

- (20)—E. HAUG—Bull. Soc. Géol. de France—Ser 3—Vol. 28 (1900).
- (21)—M. GIGNOUX—«Géologie Sstratigraphique»—2.^a ed., París (1934).
- (22)—A. DEMAY—Bull. Soc. Géol. de France—Ser. 5-Fasc. 4 (1934).
- (23)—I. PATAC—Asociación Española para el Progreso de las Ciencias—XV Congreso—Santander (1938).
- (24)—A. LOMBARD—«Le Charbon»—Dunod, París (1946) p. 149.
- (25)—CROSS y BEVAN—Trans. Chem. Soc.—Vol. 79—p. 366 (1901).
- (26)—P. KARRER—Helvetica Chimica Acta—Vol. 5-p. 187 (1922).
- (27)—IRVINE—British Association Reports—(Septiembre de 1922).
- (28)—W. N. HAWORTH—X.^a Conf. Unión Intern. Chimie—(1930) p. 33.
- (29)—L. ZECHMEISTER y G. TOTH—Ber.—Vol. 64—p. 854 (1931).
- (30)—R. WILLSTÄTTER y ZECHMEISTER—Ber.—Vol. 46—p. 2.401 (1913).
- (31)—P. KLASON—Ber.—Vol. 53—p. 706 y 1.862 (1920).
- (32)—A. DUPARQUE—Ann. Soc. Géol. du Nord—Vol. 51—p. 432-3 (1926).
- (33)—D. WHITE—Econ. Geol.—Vol. 3—p. 292-318 (1908).
- (34)—LIESKE y HOFMANN—Brennstoff Chem.—Vol. 9—p. 174-282 (1928).
- (35)—S. A. WAKSMAN—Brennstoff Chem.—Vol. 13—p. 241-7 (1932).
- (36)—TAYLOR—Fuel—Fasc. 5—p. 238-9 (1928).
- (37)—F. BERGIUS—«Die Anwendung hoher Drucke bei chemischen Vorgängen und eine Nachbildung des Entstehungsprozesses der Steinkohle»—Halle (1913).
- (38)—W. FUCHS—Brennstoff Chemie—p. 337—40 (1927).
- (39)—J. MARCUSSON—Z. Angew. Chem.—Vol. 40—p. 1.104-6 (1927).
- (40)—J. MARCUSSON—Z. Angew. Chem.—Vol. 34—p. 437 (1921).
- (41)—F. FISCHER, H. SCHRADER y W. TREIBS—Ges. Abhand. z. Kennt. d. Kohle—(V)—p. 221 (1922).
- (42)—H. TROPSCH y A. SCHELLENBERG—Ges. Abhand. z. Kennt. d. Kohle—(VI)—p. 191, 196, 214, 235 y 248 (1922).
- (43)—F. FISCHER y H. SCHRADER—Brennstoff Chem.—Vol. 2.—p 37-45 (1921) y Vol. 3—p. 67-72 y 341-3 (1922).
- (44)—K. YASUI—Bot. Mag. Tokyo—Vol. 39—p. 280-97 (1925).
- (45)—S. A. WAKSMAN—Cellulosechem.—p. 97-104 (1927).
- (46)—E. MERTENS—«Les Origines Chimiques de la Houille» (1929) p. 401.
- (47)—R. WILLSTÄTTER y L. KALB—Ber.—Vol. 55—p. 2.640 (1922).
- (48)—E. BERL y A. SCHMIDT—Ann.—Vol. 493—p. 97-152 (1932).
- (49)—E. BERL y H. KELLER—Ann.—Vol. 501—p. 84-106 (1933).
- (50)—E. MERTENS y J. MASSINON—«Les Grands Problèmes actuels de la Chimie de la Houille»—H. Vaillant-Carmagne S. A.—Lieja (1941) p. 100.
- (51)—A. DUPARQUE—Ann. Soc. Géol. du Nord—Vol. 51—p. 453-6 (1926).
- (52)—G. L. STADNIKOFF—Proceedings of the Second International Conference on Bituminous Coal—Pittsburg—Vol. I—p. 608 (1928).

- (53)—D. WHITE y R. THIESSEN—U. S. Bur. of Mines Bull.—N.º 38—p. 33 (1913).
- (54)—E. S. MOORE—«Coal»—John Wiley & Sons Inc.—Nueva York—2.ª Ed. (1947) p. 179.
- (55)—E. C. DAPPLES—Econ. Geol.—Vol. 34—p. 369-98 (1939).
- (56)—C. HILT—Z. Ver. deut. Ing.—Vol. 17—p. 194-202 (1873).
- (57)—PETRASCHER y WILSER—Z. des deut. geol. Gessell.—Vol. 76 (1924).
- (58)—M. LEGRAYE—«Les Constituants des Charbons»—Dunod—Paris (1933) p. 105-126.
- (59)—T. STADNICHENKO—Econ. Geol.—Vol. 29—p. 511-43 (1934).