

## PIRÓLISIS DE BAGAZO DE CAÑA A ESCALA DE LABORATORIO, PARTE II: CARACTERIZACIÓN DE PRODUCTOS LÍQUIDOS DE PIRÓLISIS

Margarita Penedo Medina, Giselle Giralt Ortega, Yayné Bertrán Guilarte, Ana Sánchez del Campo Lafita, José Falcón Hernández

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente

*Los productos líquidos de la pirólisis están constituidos por una gran variedad de compuestos orgánicos. Las condiciones de desarrollo del proceso y la composición de la biomasa influyen, notablemente, en la composición de los líquidos de pirólisis. En este trabajo se presenta el resultado de la caracterización de tres fracciones líquidas obtenidas en la pirólisis al vacío del bagazo de caña, a las cuales se les realizaron análisis por cromatografía gaseosa y espectrometría de masas. La fracción de alquitrán vegetal está constituida, fundamentalmente, por levoglucosano y compuestos fenólicos, mientras que el ácido piroleñoso tiene en su composición ácidos carboxílicos tales como el ácido acético, ácido fórmico, ácido propanoico, entre otros.*

**Palabras clave:** pirólisis, alquitrán, ácido piroleñoso, bagazo de caña, levoglucosano, ácido acético, fenol.

*The liquid products of pyrolysis are constituted for a large variety of organic compounds. The conditions of development of process and composition of the biomass influence notably in the composition of the liquids of pyrolysis. This paper presents the results of characterization by gas chromatographic–mass spectrometric (GC–MS) analysis of three liquid fractions that were obtained by vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. The fraction of tar is constituted fundamentally by levoglucosan and phenolic compounds, while the pyrolygneous acid has in its composition carboxylic acids such as acetic, formic, and propanoic among others.*

**Key words:** pyrolysis, tar, pyrolygneous acid, sugarcane bagasse, levoglucosan, acetic acid, phenol.

### Introducción

Los procesos de conversión de la biomasa muestran un amplio desarrollo, sobre todo, por la necesidad que tiene la humanidad de obtener energía a partir de fuentes renovables y baratas, así como productos químicos necesarios en diferentes ramas. Los procesos de termoconversión tienen aplicación en el tratamiento y aprovechamiento de residuos forestales y agroindustriales, residuos sólidos municipales, entre otros, los cuales son revalorizados al aprovecharlos con determinados fines.

La pirólisis es uno de los procesos de conversión térmica de la biomasa que antiguamente se utilizaba para obtener el etanol, ácido acético, metanol y acetona; esta vía dejó de tener aplicación en el siglo XX al desarrollarse vertiginosamente la Industria Petroquímica y de la síntesis orgánica. Mediante la pirólisis de materiales diversos es posible obtener productos químicos tales como bio-aceites, carbón vegetal, de gran demanda como combustible, para

obtener carbón activado y como materia prima en la industria del acero en países como Brasil.

Con relación a los líquidos de pirólisis, es importante profundizar en sus características, dada las posibilidades de aplicación que éstos tienen. Por ejemplo, los líquidos de pirólisis flash, pueden ser utilizados como biocombustibles (Bridwater, 2003); la separación de fenoles a partir de líquidos de pirólisis y la obtención a partir de estos últimos de resinas fenol formaldehído (Díaz y Maury, 2004); la formulación de emulgentes para emulsiones diesel-agua (Penedo, 2000. Chiaramonti *et al.*, 2003; Ferro *et al.*, 2006) entre otras aplicaciones. Recientemente, los líquidos de la pirólisis se han aplicado en la lixiviación de minerales, siendo evaluados como agentes de extracción en el tratamiento de residuos sólidos de la minería e hidrotmetalurgia del níquel (Penedo *et al.*, 2005).

Estas aplicaciones sugieren la necesidad de una caracterización química de los líquidos de pirólisis que se obtienen de diferentes residuos de

la agroindustria en nuestro país, como pueden ser el bagazo de caña, la cascarilla de arroz y café, cascarón de coco, madera y aserrín de madera, así como otros residuos agrícolas y forestales.

Los productos líquidos de pirólisis de biomasa vegetal están constituidos por una gran variedad de compuestos orgánicos, y su composición depende, en gran medida, de las condiciones de desarrollo del proceso y de la composición de la biomasa. Reportes sobre las características de fracciones líquidas obtenidas por pirólisis en diferentes condiciones han sido reportadas por (Boucher, Chaala y Roy, 2000 a; Boucher *et al.*, 2000 b; García *et al.*, 2002; Penedo, 2000). Estos autores coinciden en que el carácter ácido del líquido de pirólisis está dado por compuestos orgánicos como el ácido acético, el ácido fórmico, y otros compuestos de bajo peso molecular. García *et al.*, (2002) reportó que el ácido piroleñoso del bagazo de caña contiene un 16 % de tales compuestos orgánicos.

En este trabajo se presentan los resultados de la caracterización química de líquidos de pirólisis obtenidos a partir de bagazo de caña de azúcar a diferentes condiciones de temperatura, velocidad de calentamiento y densidad aparente de la biomasa.

## Materiales y métodos

### Procedimiento de obtención de los líquidos de pirólisis

Los productos líquidos que se caracterizaron químicamente en este trabajo se obtuvieron por pirólisis de bagazo de caña en una instalación a escala de laboratorio. Las características de la instalación y el procedimiento de pirólisis fueron reportados por Penedo *et al.*, (2008). En la figura 1 se muestra esquemáticamente la instalación experimental de pirólisis.

La mezcla vapor-gas producida dentro del horno de pirólisis, se extrae de la zona de reacción hacia el sistema de separación, por la acción de una bomba de vacío colocada en el extremo final del sistema; la primera fracción líquida que se separa es el alquitrán vegetal (fracción I), la cual

se obtiene por separación mecánica de las gotas de esta sustancia, que en forma de aerosol acompañan la fase vapor-gas que sale del horno. La mezcla vapor-gas prácticamente libre de alquitrán, continúa hacia el primer condensador; el líquido obtenido es la fracción II; a continuación la mezcla de volátiles pasa a la segunda etapa de condensación y se colecta la fracción III; el colector final se sumerge en un baño de agua helada. El gas resultante de la pirólisis circula por un frasco trampa, donde se colectan las gotas de líquido que pueden ser arrastradas, evitando así, que lleguen a la bomba de vacío.

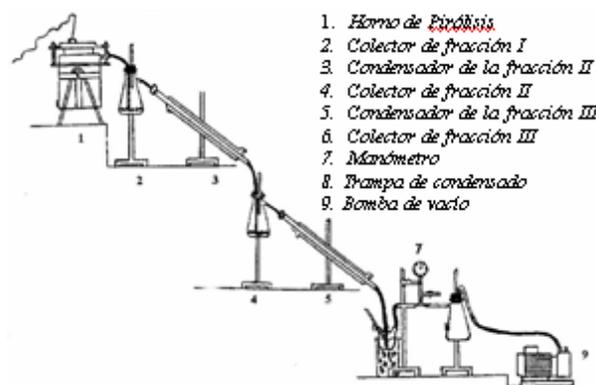


Fig. 1 Instalación experimental de pirólisis al vacío de biomasa vegetal.

### Caracterización por cromatografía gaseosa y espectrometría de masa (CG/EM) de los productos líquidos de pirólisis

Los análisis de cromatografía gaseosa-espectrometría de masas (CG/EM), practicados a los líquidos de pirólisis, se realizó con un cromatógrafo de gases Hewlett-Packard 5890 Serie 2 Plus, con una columna capilar de 60 m, y con un espectrómetro de masas Hewlett-Packard 5989B conectado en línea. Los diferentes picos cromatográficos fueron identificados por comparación del espectro de masa con los de la librería WILEY 6N, disponible en el equipo. En la tabla 1 aparece el tiempo de retención y el intervalo de confianza con respecto al espectro de referencia para cada compuesto.

Tabla 1  
Tiempo de retención de los compuestos patrones

Nº del Compuesto	Tiempo de Retención, min	Compuesto	Intervalo de confianza
1	2,76	Agua	90
2	2,85	Agua	90
3	2,98	Agua	90
4	3,26	Acetona	81
5	3,81	Acido fórmico	80
6	4,65	Etanol	95
7	5,15	Acido acético	95
8	5,55	Acido acético	95
9	5,67	Acido acético	95
10	6,03	Acido acético	95
11	6,18	Acido acético	95
12	6,41	Acido acético	95
13	7,28	2-Propanona, 1-hidroxi	95
14	8,83	Acido propanoico	47
15	9,01	Acido fórmico, metil etil ester	9
16	10,61	1-Hidroxy-2-butanona	62
17	11,15	Propanal	61
1	12,15	1-Metoxi-1-buten-3-ino	80
8	12,76	Acido acético etenil ester	35
19	13,46	3-metil -1-Butino,	90
20	13,72	2(3H)-Furanona, dihidro	87
21	13,80	Acido fórmico, propil ester	7
22	14,06	2(5H)-Furanona, 5-metil	69
23	14,16	2,5-Furandiona, dihidro-3-metilen-	78
24	14,46	5-metil furfural	78
25	14,55	Fenol	95
26	14,90	2(5H)-Furanona,3-metil	53
27	15,26	1,2-Ciclopentanodiona, 3-metil	93
28	15,39	2-etil, 1,3-butadieno	50
29	15,58	Piridina, 3,5-dimetil	46
30	15,80	Fenol, 4-metil	96
31	16,03	Fenol, 4-metoxi	91
32	16,28	Ciclopropil carbinol	50
33	16,37	3,5-Dimetil-ciclopentano-1,2-diona	25
34	16,83	Fenol, 4-etil	96
35	17,15	1-Pentyne	50
36	17,57	4-Metil-2(5H)-Furanona	78
37	20,19	Levoglucosano	78

### Líquidos de pirólisis sometidos a caracterización

En la parte I de este trabajo (Penedo *et al.*, 2008) se presentó la influencia de los factores velocidad de calentamiento, temperatura, tiempo y densidad aparente, en el rendimiento de líquido. Como se observó en ese caso, la velocidad de

calentamiento y densidad aparente resultaron significativos, a un nivel de confianza de 97,5 y 95 %; mientras que las interacciones de los factores velocidad de calentamiento-temperatura, y temperatura-densidad aparente resultaron también significativas, con un intervalo de confianza de 90 y 95 %, respectivamente.

En este trabajo se presentan los resultados de análisis de CG/EM de los líquidos, procedentes de experimentos desarrollados a diferentes condiciones de operación, con el objetivo de evaluar el efecto de las mismas en la composición de las fracciones líquidas obtenidas. Las variables consideradas fueron: velocidad de calentamiento, temperatura final y densidad aparente de las briquetas de bagazo. En la tabla 2 se muestran las condiciones experimentales, en las cuales se obtuvieron los líquidos de pirólisis a los que se les realizó el análisis de cromatografía gaseosa y espectrometría de masas.

### Efectos analizados:

- Experimentos 1 y 2: Incremento de la velocidad de calentamiento.
- Experimentos 1 y 5: Incremento de la temperatura final.
- Experimentos 1 y 6: Incremento de la velocidad de calentamiento y temperatura final.
- Experimentos 2 y 10: Incremento de la densidad aparente.

Tabla 2  
Condiciones experimentales a las cuales se obtuvieron las fracciones de líquidos sometidos a análisis de cromatografía gaseosa

Experimentos*	Velocidad de calentamiento °C / min	Temperatura final °C	Densidad de las briquetas de bagazo de caña kg/ m <sup>3</sup>
1	5,4	425	263,8
2	12,4	425	263,8
5	5,4	475	263,8
6	12,4	475	263,8
10	12,4	425	362,4

\*Resultados de (Penedo *et al.*, 2008).

## Resultados y discusión

### Resultados de la cromatografía de gases y espectrometría de masas para el alquitrán vegetal

El rendimiento en masa de alquitrán vegetal que se obtuvo en los diferentes experimentos, es

bastante bajo, por ello para realizar el análisis de CG/EM del mismo, se mezclaron las muestras obtenidas de varios experimentos. En la figura 2 se muestra el cromatograma correspondiente a la fracción I, y en la tabla 3 se relacionan los compuestos principales que se identifican en dicha fracción y su abundancia relativa.

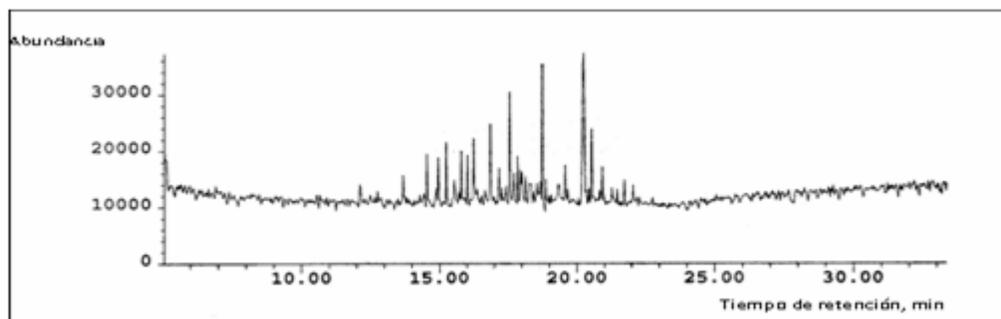


Fig. 2 Cronograma correspondiente a la fracción I (alquitrán vegetal).

Tabla 3  
Contenido de compuestos principales en el alquitrán vegetal (% de abundancia)

Compuesto	% de abundancia	Compuesto	% de abundancia
Levoglucosano	14,37	4-etil-fenol	4,768
Ciclopropilcarbinol	5,065	4-metil-fenol	3,775
4-metil-2(5H)-furanona	4,506	4-metoxi-fenol	2,282
2(5H)-Furanona-3-metil	3,309	Fenol	2,490
Ácido acético	3,448	Fenoles totales	13,315

Como se observa en el cromatograma de la figura 3, el compuesto más abundante en el alquitrán vegetal obtenido por pirólisis de bagazo de caña, es el levoglucosano (1,6-anhidroglucosa), compuesto polihidrocarbonado, del grupo de los hidratos de carbono; es un compuesto sensible al calor, y se descompone en ácido acético, acetona, fenol y agua. Su contenido relativo en el alquitrán es de 14,37 %.

Se conoce que el bagazo de caña, proviene de la etapa en la cual los tallos de la caña de azúcar son sometidos a la molienda y lixiviación con agua caliente, teniendo lugar el cambio de estructura de la celulosa, así como la eliminación de gran parte de los extractables contenidos en la fibra vegetal.

De acuerdo con esto, es posible pensar que el grado de hidrolización de la celulosa presente en el bagazo, conjuntamente con su bajo contenido de extractables, condicionan la formación del levoglucosano, y por tanto su presencia en el alquitrán vegetal. Otro aspecto de considerar es, que la abundancia de levoglucosano puede ser algo superior, en el momento en que se obtiene el alquitrán, por cuanto se plantea que el mismo puede llegar a descomponerse en otros tipos de compuestos orgánicos, como ácido acético, agua y fenoles, también presentes en el alquitrán.

El cromatograma de la figura 2 muestra, que los compuestos con tiempos de retención menor de 12 min, son poco abundantes en el alquitrán vegetal; entre éstos deben mencionarse el agua, el ácido acético, el ácido fórmico. En el intervalo de 14 y 20 minutos de tiempo de retención, se identifican varios tipos de compuestos, sobre todo

fenoles y cetonas, abundantes en el alquitrán vegetal; los fenoles son resultado de la descomposición térmica de la lignina fundamentalmente. Esta cualidad del alquitrán demuestra su potencial como fuente de obtención de fenoles, lo que ha sido reportado por varios investigadores (Chum y Black, 1990; Guha et al., 1987; Caraza *et al.*, 1994; Amen-Chen *et al.*, 1997).

Los compuestos fenólicos identificados en el alquitrán vegetal, que son fundamentalmente el resultado de la descomposición térmica de la lignina (Wenzl, 1970), se encuentran también en cantidades apreciables, alrededor de 13,31 % de abundancia. Igualmente se han identificado derivados furánicos provenientes, fundamentalmente, de la descomposición de las hemicelulosas tales como la 4-metil-2(5H)-furanona; 2(5H)-furanona, 3-metil.

## Resultados de la cromatografía de gases y espectrometría de masas de las fracciones II y III de los experimentos seleccionados

### Experimentos 1 y 2. Incremento de la velocidad de calentamiento

En las figuras 3 y 4 se muestran los cromatogramas correspondientes a las fracciones II y III del experimento 1, y en las figuras 5 y 6 los correspondientes al experimento 2. Se observa que en estas fracciones existen compuestos orgánicos no oxigenados, así como compuestos orgánicos oxigenados (compuestos carbonilos, ésteres, fenoles y levoglucosano).

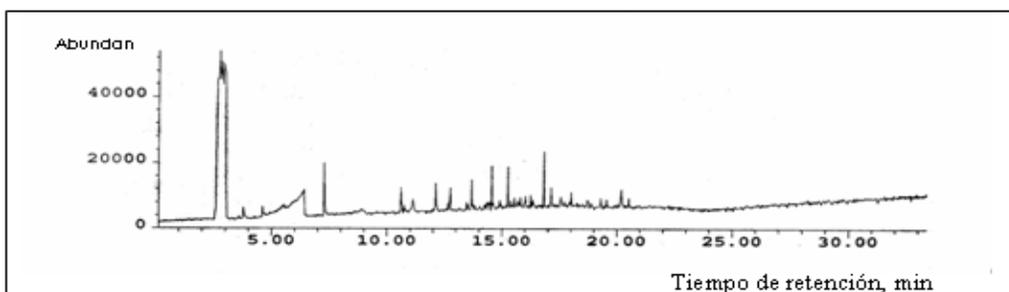


Fig. 3 Reporte de CG/EM de la fracción II experimento 1.

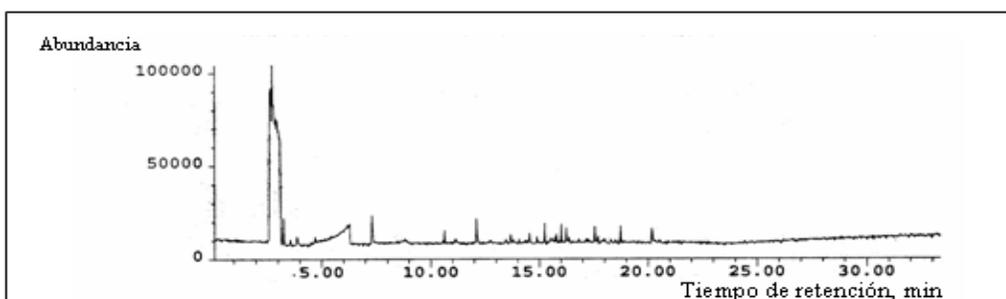


Fig. 4 Reporte de CG/EM de la fracción III experimento 1.

Los compuestos con tiempos de retención inferiores a 10 min son, principalmente el agua, acetona, etanol y ácido acético (tabla 4), con intervalos de confianza superiores a 80 %. En el caso de los líquidos provenientes del experimento 1 se observa, que los compuestos principales son los antes mencionados. Los picos que aparecen en el cromatograma

de la fracción I y II del experimento 1 son muy semejantes, sobre todo en el intervalo de tiempos de retención correspondientes al agua y al ácido acético, mientras que la fracción II es más rica que la fracción III en compuestos tales como el fenol y fenol 4-etil. El contenido de levoglucosano en estas fracciones es bastante bajo.

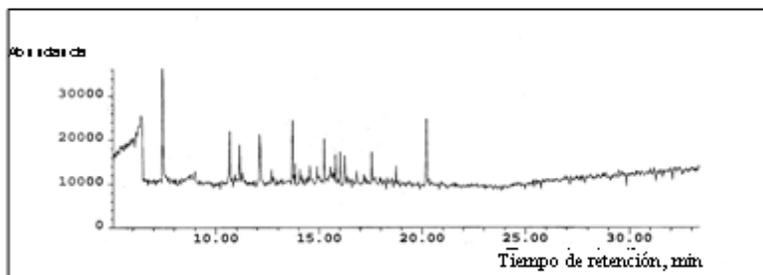


Fig. 5 Reporte de CG/EM de la fracción III experimento 2.

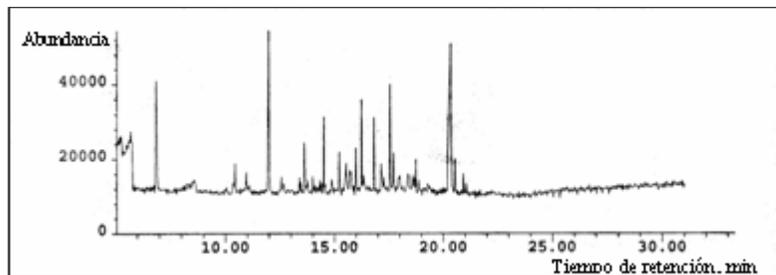


Fig. 6 Reporte de CG/EM de la fracción III experimento 2.

Los cromatogramas correspondientes al experimento 2 contrastan con los correspondientes al experimento 1. Tanto para la fracción II como para la fracción III, existen diferencias apreciables en el contenido de determinados compuestos,

fundamentalmente de aquellos que poseen tiempos de retención por encima de 10 min; en la tabla 4 se muestra el contenido de los compuestos más abundantes en las dos fracciones líquidas para cada experimento.

Tabla 4  
Contenido de compuestos principales en los líquidos de los experimentos 1 y 2 (% de abundancia)

Compuesto	Fracción II		Fracción III	
	Exp. 1	Exp. 2	Exp. 1	Exp. 2
❖ Levoglucosano	1,501	4,127	1,238	15,624
❖ Acido acético	15,08	35,23	0,489	9,023
❖ 2(3H)-Furanona dihidro	1,28	4,228	0,608	2,916
❖ 1,2-Ciclopentanodiona, 3-metil	1,924	2,813	1,081	2,031
❖ Fenol	1,86	3,069	0,957	2,710
❖ 4-Metil, fenol	2,206	2,534	1,033	2,808
❖ 4-Metoxi, fenol	0,944	2,098	1,335	1,835
❖ 4-etil, fenol	2,206	1,844	0,806	2,791
❖ Fenoles totales	7,216	9,545	4,131	10,144

El incremento en el régimen de calentamiento provoca un mayor contenido de levoglucosano, fundamentalmente en la fracción III, así como un incremento de los fenoles totales. El contenido de ácido acético también se incrementa sensiblemente tanto en la fracción II como en la III.

El intervalo en el cual se fijaron los niveles de velocidad de calentamiento para estos dos experimentos fue estrecho, de 5,4 a 12,4 °C/min, característico de pirólisis lenta. Sin embargo, se puede apreciar el efecto de dicho incremento sobre el rendimiento de diferentes compuestos.

### Experimentos 1 y 5. Incremento de la temperatura final

En el experimento 5 se mantuvieron los mismos niveles de las variables que en el experimento 1, excepto la temperatura, que se fijó en el nivel superior (475 °C). El efecto del incremento de la temperatura final sobre la distribución de los componentes identificados en las fracciones líquidas, se analiza a través del contraste de los

resultados de la CG/EM, correspondientes a las fracciones II y III resultantes de ambos experimentos. Los cromatogramas de los líquidos obtenidos en el experimento 5 (figuras 7 y 8), permiten apreciar una mayor abundancia de determinados compuestos, especialmente un mayor contenido de levoglucosano, fenoles, 2(3H)-furanona dihidro y la 1,2-ciclopentanodiona, 3-metil que en las fracciones líquidas del experimento 1 (tabla 5).

El incremento del contenido de fenoles en los líquidos del experimento 5, desarrollado a mayor temperatura que el experimento 1, puede resultar contradictorio si se tiene en cuenta que los fenoles tienden a descomponerse en la medida en que la temperatura se incrementa. Esto puede explicarse por el hecho de que los productos de la reacción son removidos continuamente de la cámara de pirólisis por efecto del vacío, siendo condensados y enfriados rápidamente en el sistema de condensación. El incremento de levoglucosano por efecto del desarrollo del proceso a una temperatura superior es apreciable, sobre todo en la fracción III.

Tabla 5  
 Contenido de compuestos principales en los líquidos  
 de los experimentos 1 y 5 (% de abundancia)

Compuesto	Fracción II		Fracción III	
	Exp. 1	Exp. 5	Exp. 1	Exp. 5
❖ Levoglucosano	1,501	7,63	1,238	12,967
❖ Acido acético	15,08	17,41	0,489	14,065
❖ 2(3H)-Furanona dihidro	1,28	5,049	0,608	4,626
❖ 5-metil furfural	0,446	1,598	-	2,472
❖ Fenol	1,86	2,144	0,957	1,885
❖ 1,2-Ciclopentanodiona, 3-metil	1,924	5,222	1,081	4,026
❖ 4-metil, fenol	2,206	2,547	1,033	2,113
❖ 4-metoxi, fenol	0,944	2,354	1,335	1,808
❖ 4-etil, fenol	2,206	2,033	0,806	2,581
❖ Fenoles totales	7,216	9,078	4,131	8,387

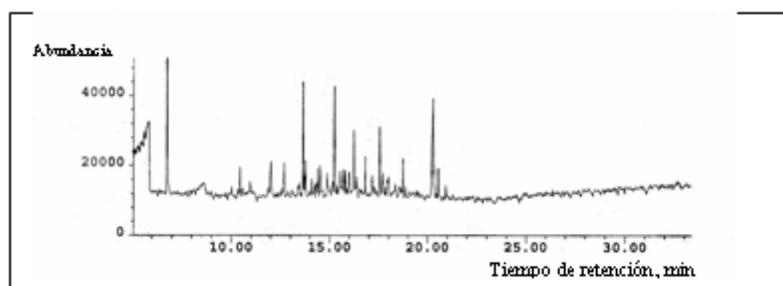


Fig. 7 Reporte de CG/EM de la fracción II experimento 5 de pirólisis.

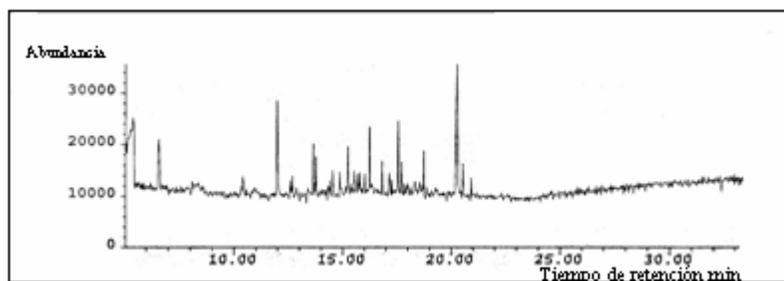


Fig. 8 Reporte de CG/EM de la fracción III experimento 5 de pirólisis.

Según datos reportados por Conesa *et al.*, (1995), durante la pirólisis al vacío de la celulosa, el rendimiento de levoglucosano se incrementa en la medida en que aumenta la temperatura, pero sólo hasta aproximadamente los 500 °C, temperatura por encima de la cual se favorece la aparición de otros compuestos volátiles, debido a la deshidratación, descarboxilación y decarbonilación de las unidades de anhidroglucosas.

### Experimentos 1 y 6. Incremento de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final de la pirólisis

A través de los resultados de CG/EM practicados a las fracciones II y III del experimento 6, y contrastando los mismos con los obtenidos para el experimento 1, se analiza el efecto del incremento simultáneo de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final de pirólisis en la composición.

En la tabla 6 y las figuras 9 y 10 se presentan los resultados del experimento 6. Se aprecia un notable incremento del contenido de compuestos carbonados con tiempos de residencia superiores a los 10 min, fundamentalmente en la fracción II. El máximo rendimiento de levoglucosano en la

fracción II se obtiene en la corrida 6, aunque en la fracción III es mucho más alto su contenido. El rendimiento de todos los tipos de fenoles se incrementa en el experimento 6 con relación al 1, aunque se mantienen a niveles similares a los del experimento 2 y 5.

Tabla 6  
Contenido de compuestos principales en los líquidos de las corridas 1 y 6 (% de abundancia)

Compuesto	Fracción II		Fracción III	
	Exp. 1	Exp. 6	Exp. 1	Exp. 6
Levoglucosano	1,50	12,28	1,24	12,97
Acido acético	15,08	-	0,49	14,07
Fenol	1,86	1,95	0,96	2,17
1,2-Ciclopentanodiona, 3-metil	1,92	4,68	1,08	2,85
4-metil, fenol	2,21	3,69	1,03	2,88
4-metoxi, fenol	0,94	3,64	1,34	2,37
4-etil, fenol	2,21	-	0,81	2,31
Fenoles totales	7,22	9,08	4,13	8,39
4-metil-2(5H) furanona	0,99	5,23	0,99	3,54

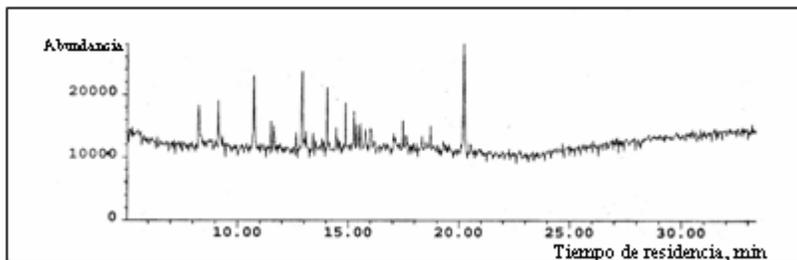


Fig. 9 Reporte de CG/EM de la fracción II experimento 6.

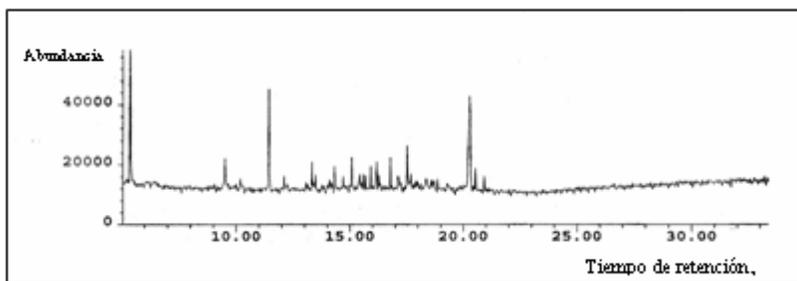


Fig. 10 Reporte de CG/EM de la fracción III experimento 6.

### Experimentos 2 y 10. Incremento de la densidad aparente

En las figuras 11 y 12 se muestran los cromatogramas correspondientes a las dos fraccio-

nes del experimento 10. Comparándolos con los del experimento 2, se puede observar un comportamiento similar en cuanto a los tipos de compuestos que aparecen en las fracciones tanto a nivel inferior como superior de densidad.

La tabla 7 muestra el contenido relativo de los compuestos más importantes. El contenido de fenoles es inferior en ambas fracciones del experimento 10; en el caso del 4-metil fenol hay un incremento en la fracción II. También se incrementa el contenido de levoglucosano en la fracción II a la mayor densidad aparente.

Se puede pensar en una posible relación entre el aumento del contenido de ácido acético y de fenoles con la disminución del levoglucosano cuando se trabaja a un nivel inferior de densidad

aparente, debido a la descomposición de éste en dichos compuestos.

Se ha podido advertir, a través de los resultados del análisis estadístico de los experimentos de pirólisis al vacío (Penedo *et al.*, 2008), que la densidad del sólido influye, significativamente, a través de su interacción con la temperatura en el rendimiento de los líquidos de la pirólisis, y que los mayores rendimientos se obtienen con ambas variables en el nivel inferior, lo cual favorece a la vez, como se observa en el análisis cromatográfico, un mayor contenido de compuestos fenólicos.

Tabla 7  
Contenido de compuestos principales en los líquidos de los experimentos 2 y 10 (% de abundancia)

Compuesto	Fracción II		Fracción III	
	Exp. 2	Exp. 10	Exp. 2	Exp. 10
❖ Levoglucosano	4,127	10,387	15,624	12,984
❖ Acido acético	35,23	7,232	9,023	-
❖ 2(3H)-Furanona dihidro	4,228	4,717	2,916	-
❖ 1,2-Ciclopentanodiona, 3-metil	2,813	3,293	2,031	2,385
❖ 4-metil-2(5H)-furanona	1,838	-	3,930	3,771
❖ Fenol	3,069	1,478	2,710	2,091
❖ 4-Metil, fenol	2,534	4,203	2,808	2,345
❖ 4-Metoxi, fenol	2,098	1,699	1,835	2,584
❖ 4-etil, fenol	1,844	1,683	2,791	0,838
❖ Fenoles totales	9,545	8,598	10,144	7,858

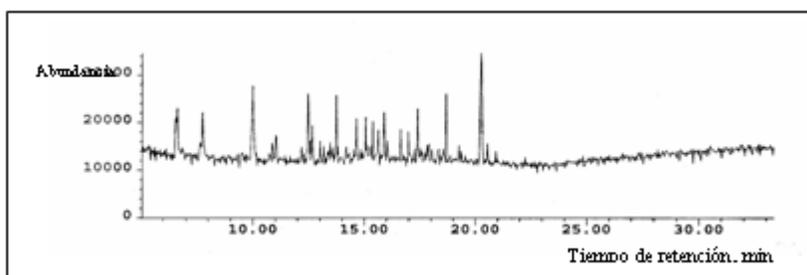


Fig. 11 Reporte de CG/EM de la fracción II experimento 10.

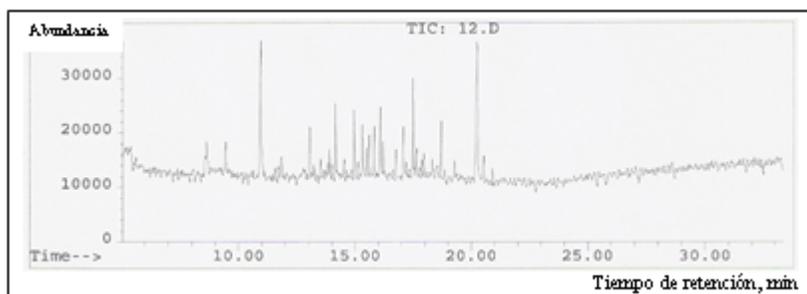


Fig. 12 Reporte de CG/EM de la fracción II experimento 10.

---

## Conclusiones

En las tres fracciones líquidas obtenidas por pirólisis de bagazo de caña analizadas por cromatografía gaseosa y espectrometría de masas, fueron identificadas 31 sustancias a través del contraste con los patrones disponibles, aunque se conoce que es mayor el número de compuestos que las constituyen. Entre las sustancias que componen estas mezclas se encuentran, compuestos oxigenados y con insaturaciones; compuestos carbonilos, ésteres, fenoles, aldehídos y cetonas; además de levoglucosano.

La abundancia de los compuestos fenólicos en las diferentes fracciones estuvo influenciada por las condiciones de desarrollo del proceso, evidenciándose un incremento del contenido total de fenoles, tanto en la fracción II como en la III, con el incremento de la velocidad de calentamiento y de la temperatura final, y con el incremento simultáneo de estas variables.

Con relación al levoglucosano, el incremento de la velocidad de calentamiento provocó un aumento del contenido del mismo en las fracciones II y III, al igual que el incremento de la temperatura, observándose los rendimientos más altos cuando ambas variables se encuentran en el nivel superior, correspondiendo ello a las condiciones del experimento 6. La presencia de un alto contenido de levoglucosano en todas las fracciones líquidas indica, que al ser removidos los productos primarios de la zona de reacción, se reducen las reacciones secundarias en la fase gaseosa.

El ácido acético también fue uno de los compuestos más abundantes en algunas fracciones obtenidas durante la pirólisis, siendo alto su contenido sobre todo en la fracción II y III del experimento 5, donde el régimen de calentamiento se mantuvo en el nivel superior, y con la temperatura y la densidad aparente del sólido en el nivel inferior. El contenido de otros compuestos es importante en algunas fracciones; por ejemplo la 4-metil-2 (5H)-furanona; la 1,2-ciclopentanodiona, 3-metil; la 2 (3H)-furanona, dihidro. De éstos, el primero y el segundo se encuentran en una cantidad apreciable en el alquitrán vegetal, en el cual son abundantes otros compuestos oxigenados que presentan insaturaciones.

## Bibliografía

- Amen-Chen, C., Pakdel, H., Roy, Ch. Separation of phenols from eucalyptus Wood tar. *Biomass and Bioenergy*, vol. 13, Nos 1/2, págs. 25-37, 1997.
- Boucher, M.E., Chaala, A., Roy, C. *Biomass Bioenergy* 19 (5), págs. 337, 2000 a.
- \_\_\_\_\_, Pakdel, H., Roy, C., *Biomass Bioenergy* 19 (5), págs. 351, 2000 b.
- Bridgwater, A.V., *Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering Journal* 91 (2003) 87-102
- Carazza, F., Rezzende, M. E., Pasa, V. M., Lessa, A. *Fractionation of wood tar. Advances in th Thermochemical Biomass Conversion*, 2, págs. 1465-1474, 1994.
- Chiaramonti, D., Bonini M., Fratini, E., Tondi, G., Gartner, K., Bridgwater, A. V., Grimm, H.P., Soldaini, I., Webster, A., Baglioni, P., "Development of emulsions from biomass pyrolysis liquid and diesel and their use in engines—Part 2: tests in diesel engines". *Biomass and Bioenergy*, 25 (2003), págs. 101-111.
- Conesa, J. A., Caballero, J. A., Marcilla, A., Font, R. *Thermocim, Act.* 254 (1995), pag. 175.
- Díaz A.M., Maury E., "Polimerización de alquitrán obtenido por pirólisis de la hoja de tabaco", *Revista Tecnología Química. Vol XXIV Nro1 Año 2004.*
- Ferro Nieto, A., Toledo A. A., Falcón H. J., "Emulsiones de crudo cubano con Emulgente P. Estudio de estabilidad y viscosidad" *Revista Cubana de Química, volumen XVIII, No 1, págs. 09-26, 2006.*
- García, P. M., Chaala, A., Roy, Ch. (2002). *Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 65, 111.
- Guha, R. D., Das, D., Grover, P. D., Guha, B. K., *Biol. Waste*, vol. 21, págs. 93-100, 1987.
- Penedo, Margarita: "Obtención de productos líquidos de la pirólisis del bagazo de caña. Su aplicación en la formulación de emulgentes para emulsiones Agua – Diesel", *Tesis de Maestría, 2000.*
- Penedo Medina, M., Maury C. E., Giralt O. G., Beltrán G.Y.: "Lixiviación de las colas del proceso carbonato amoniacal de extracción de níquel y cobalto con productos líquidos de la pirólisis del bagazo de caña", *XVIII Conferencia de Química, Diciembre de 2005.*
- Penedo Medina, M., Sánchez del Campo Lafita, A., Falcón Hernández, J. *Pirólisis de bagazo de caña a escala de laboratorio, Parte I: influencia de condiciones de operación en el rendimiento de productos*, *Revista Tecnología Química, xxx-xxx, 2008.*
- Wenzl, H. F.: "The chemical technology of Wood", 1970.
- J. Zandersons,\*, J. Gravitis, A. Kokorevics, A. Zhurins, O.; Bikovens, A.; Tardenaka, B.; Spince, "Studies of the Brazilian sugarcane bagasse carbonisation process and products properties", *Biomass and Bioenergy* (17), págs. 209-219, 1999.