

Influencia de diferentes parámetros en el comportamiento al fuego de siete especies de frondosas mejicanas

Laia Haurie^a, María Pilar Giraldo^b, Ana María Lacasta^a, Joaquín Montón^b, Rodolphe Sonnier^c
Primer Autor^a, Segundo Autor^b, Autor Ponente^b, Cuarto Autor^a

^aUniversitat Politècnica de Catalunya UPC, Av. Dr. Marañón, 44-50, 08028 Barcelona Spain.

^bForest Sciences Centre of Catalonia CTFC - INCAFUST, Ctra. Sant Llorenç, km 2, 25280, Solsona, Spain.

^cCentre des Matériaux C2MA, Ecole des Mines d'Alès, 6, avenue de Clavières, 30100 Alès, France

E-mail: Laia.haurie@upc.edu

Palabras clave: comportamiento al fuego, estabilidad térmica, pirólisis, combustión

Resumen

En este artículo se analiza el comportamiento al fuego de siete maderas frondosas mejicanas. La finalidad es intentar determinar cuáles son los parámetros que ejercen influencia en el comportamiento al fuego de la madera. Uno de los factores que se considera clave es la densidad, ya que está relacionada con la velocidad de carbonización y por consiguiente esto afecta a las reacciones de pirólisis. Sin embargo, la densidad no es el único factor que influye en el comportamiento al fuego de la madera. En este trabajo se estudian siete frondosas diferentes y se analizan los resultados de los ensayos de reacción al fuego en relación a las propiedades físico-químicas de la madera.

Introducción

La madera en caso de incendio sufre una degradación térmica que engloba diferentes procesos termo-físicos y termo-químicos como transferencia de calor, secado, pirólisis, carbonización, pérdida de masa o smouldering. La densidad es uno de los parámetros que se consideran claves para obtener un mejor comportamiento al fuego de la madera, ya que un aumento de la densidad está relacionado con una disminución de la velocidad de carbonización de la madera y de las reacciones de pirolisis (1). La morfología y la composición química de la madera afectan en gran medida estos procesos complejos (2). Los constituyentes principales de la madera son celulosa, hemicelulosa y lignina. La celulosa es un polímero formado por un elevado número de unidades de glucosa. El grado de polimerización (GP) varía en función de la especie de madera, pero la celulosa de las frondosas presenta habitualmente un GP por encima de 3000 (3). La hemicelulosa está formada por polisacáridos de bajo peso molecular con un GP alrededor de 200 (4) y la lignina es un polímero aromático entrecruzado (5). Estas diferencias moleculares entre los constituyentes explican la descomposición a menores temperaturas (180-350°C) de la hemicelulosa, seguida de la descomposición de la celulosa entre 275 y 350°C y la lignina entre 250 y 500°C (6). Diferentes autores

han descrito las etapas que ocurren durante la combustión de la madera (2) (7):

- 100 - 200°C: liberación de agua y gases no combustibles.
- 200 - 300°C: pirólisis de la hemicelulosa y la lignina. Inicio de la carbonización de la madera.
- 300 - 455°C: despolimerización de la celulosa y la lignina. Liberación de gases inflamables.
- 450°C: oxidación y smouldering del residuo carbonizado.








Los extractos y exudados de la madera ejercen una influencia significativa en características esenciales de la madera, como pueden ser el color, olor, densidad, estabilidad dimensional y durabilidad (8). Estos compuestos pueden afectar también el poder calorífico y de esta manera la inflamabilidad de la madera (9). Los árboles contienen también diferentes minerales que pueden actuar como catalizadores durante la pirólisis e influir en las temperaturas y los productos liberados (10) (11).

Este trabajo proporciona un estudio detallado del comportamiento al fuego de siete especies de maderas coníferas. Se han caracterizado mediante diferentes ensayos y los resultados obtenidos se han relacionado con las propiedades físico-químicas de las especies de madera.

Materiales y métodos

La tabla 1 recoge las características de las siete especies de maderas frondosas de México analizadas en este trabajo. A continuación se detallan los ensayos realizados.

Tabla 1. Características de las diferentes especies de madera

Nomenclatura	Nombre científico	Superficie	Densidad [Kg/m ³]
TD	<i>Tabebuia donnell-smithii</i>		448
EC	<i>Enterolobium cyclocarpum</i>		504
TR	<i>Tabebuia rosea</i>		604
SH	<i>Swietenia humilis</i>		655
LA	<i>Lysiloma acapulcensis</i>		685
CA	<i>Cordia elaeagnoides</i>		1130
TC	<i>Tabebuia chrysantha</i>		1234

- Análisis termogravimétrico (TGA): Los ensayos se realizaron en un horno acoplado a una balanza de precisión. Las muestras se calentaron a 4°C/min desde 25°C a 1000°C en atmósfera de aire.

- Índice de oxígeno límite (LOI): El LOI se determinó siguiendo la norma UNE-EN ISO 4589. Las dimensiones de las muestras eran 70 mm x 10 mm x 1 mm y se colocaron verticalmente en una atmósfera controlada de nitrógeno y oxígeno. El índice de oxígeno límite es la concentración mínima a la cual el material mantiene la combustión según los criterios definidos en la norma.

- Ensayo del epiradiador: Se utilizó el equipo descrito en la norma española UNE 23725-90. La realización del ensayo consiste en colocar las muestras de 70 x 70 x 10 mm en una malla metálica de manera que la fuente de calor quede a 3cm de la superficie de la muestra. Durante el ensayo se registra el tiempo de ignición en el

momento que aparece la llama, se retira el radiador, se anota el tiempo de extinción y se vuelve a colocar el radiador sobre la muestra. Este proceso se repite durante 5 minutos. Los parámetros que se determinaron fueron el tiempo de ignición inicial (t_0), el número de igniciones (N_0) y la duración media de las combustiones (t_m).

- Microcalorímetro de pirólisis (PCFC): Se utilizó un microcalorímetro de Fire Testing Technology que consta de una cámara de pirólisis en la cual las muestras de calientan hasta 750°C a 1°C/s en atmósfera de nitrógeno. Los gases liberados se trasladan a una cámara de combustión que contiene oxígeno y nitrógeno. En función del consumo de oxígeno se determina la velocidad de liberación de calor.

- Microscopia electrónica de barrido: Se analizó la morfología de las diferentes especies, así como la presencia de elementos químicos provenientes de sustancias minerales mediante un microscopio ambiental, ESEM Quanta 200 FEI acoplado a un detector de energía dispersiva.

Resultados y discusión

Las curvas de TGA se presentan en la fig. 1. La pérdida de peso por debajo de 150°C se asigna a la liberación de agua. La descomposición por encima de 250°C ocurre en diversas etapas. Se observa una correlación entre la estabilidad térmica y la densidad de las especies de madera. La especie de menor densidad, TD, descompone a temperaturas significativamente inferiores que el resto de maderas. Esto se debe probablemente a la presencia de altos contenidos de hemicelulosa y menor presencia de celulosa y lignina. La descomposición a temperaturas más elevadas de las especies más densas, CA y TC, está probablemente relacionada con la presencia de altos porcentajes de lignina.

En la tabla 2 se presentan los resultados correspondientes al ensayo de LOI y epiradiador.

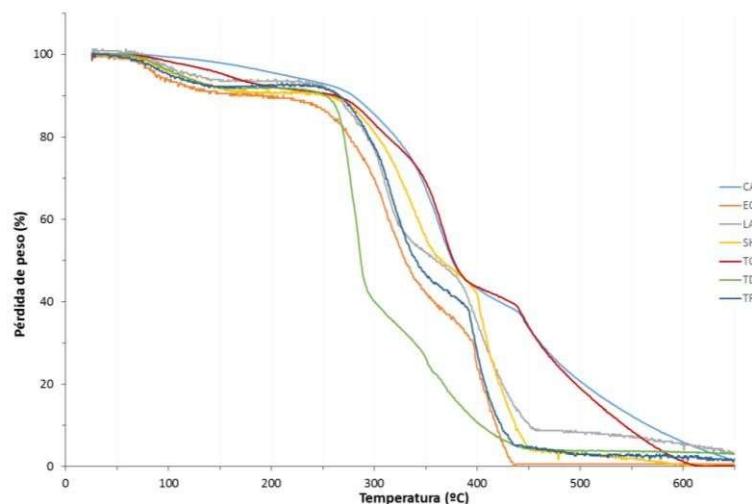


Figura 1. Resultados del análisis termogravimétrico de las diferentes especies de madera.

El tiempo de ignición inicial aumenta con la densidad de la madera. El valor más alto de LOI lo exhibe la especie LA seguido de las especies más densas CA y TC, sin embargo en este caso no existe una correlación clara entre el valor de LOI y la densidad. La especie

LA muestra una mayor capacidad de autoextinción que el resto. Por otro lado, la especie TD de menor densidad presenta los resultados más desfavorables en el ensayo de LOI y epirradiador.

Table 2. Resultados de epirradiador y LOI.

Nomenclatura	Densidad (kg/m ³)	t ₀ (s)	No	t _m (s)	LOI (%)
TD	448	17	8	29	21.1
EC	504	17	12	16	24
TR	604	24	8	29	21.5
SH	655	28	14	16	23.1
LA	685	31	16	9	26.5
CA	1130	37	9	26	25.1
TC	1234	49	13	20	24

En los ensayos del microcalorímetro de pirólisis se trabaja con muestras de tamaño reducido, lo cual minimiza el efecto de la inercia térmica. Por este motivo, la densidad no debería tener influencia en los resultados obtenidos. La tabla 3 muestra los valores del pico máximo de liberación de calor (pHRR), la temperatura a la que ocurre (TpHRR) y el calor total liberado (THR (kJ/g)). La especie LA presenta el valor más bajo de pHRR (80 W/g) y THR (8.2 kJ/g), mientras que la especie CA muestra los valores más altos, con un pHRR de 126 W/g y un THR de 13.3 kJ/g.

Tabla 3. Valores de pHRR, TpHRR y THR obtenidos con el microcalorímetro.

Nomenclatura	Densidad (Kg/m ³)	pHRR (W/g)	TpHRR (°C)	THR (kJ/g)
TD	448	117	354	10.1
EC	504	106	365	10.0
TR	604	113	362	10.5
SH	655	107	366	9.5
LA	685	80	346	8.2
CA	1130	126	373	13.3
TC	1234	93	368	9.0

Las observaciones con microscopio electrónico revelan que la estructura de las diferentes especies presenta variaciones significativas. Tal y como se observa en la fig. 2, las especies LA, CA y TC tienen una morfología más compacta en relación al resto de especies.

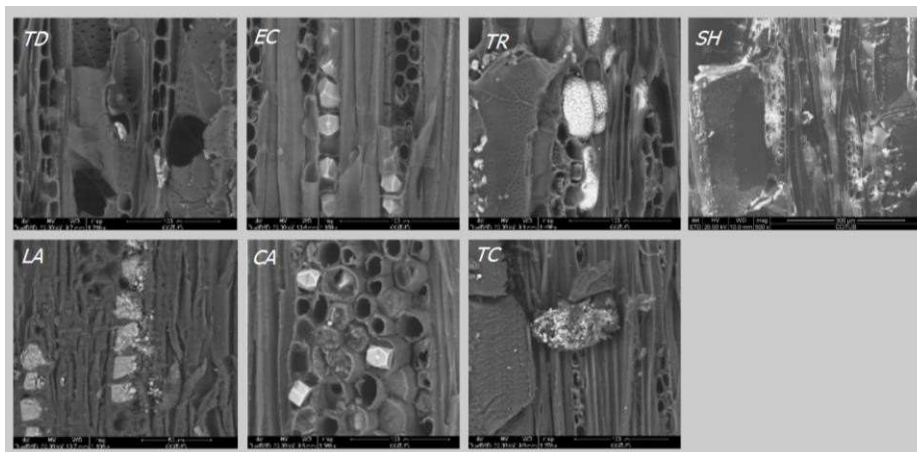


Figura 2. Imágenes de microscopio electrónico de las diferentes especies de madera.

Este hecho es de esperar en las muestras con densidades superiores a 1000Kg/m^3 como CA y TC, pero sorprende en muestras de densidad media como LA. Gran parte de los radios medulares se encuentran saturados con minerales. La presencia de compuestos inorgánicos parece estar relacionada con un incremento en la producción de compuestos que promueven la carbonización de la madera durante la pirólisis e inhiben la formación de compuestos volátiles (12) (13) (14).

Conclusiones

Se ha evaluado el comportamiento al fuego de siete especies de madera prestando especial atención a la influencia de la densidad. Se ha encontrado una buena correlación entre el aumento del tiempo de ignición y la densidad. Sin embargo, otros de los parámetros evaluados como el pHRR o el THR no presentan una relación clara con la densidad. Otros factores como la composición y la morfología de la especie parecen tener una influencia significativa en los procesos de combustión de la madera.

Referencias

- (1) A. Bartlett, R.M. Hadden, L.A. Bisby, A. Law, Analysis of cross-laminated timber charring rates upon exposure to nonstandard heating conditions, *Fire Mater.* 2015 - 14th Int. Conf. Exhib. Proc., Interscience Communications Ltd, 2015: pp. 667–681.
- (2) K.L. Friquin, Material properties and external factors influencing the charring rate of solid wood and glue-laminated timber, *Fire Mater.* 35 (2011) 303–327. doi:10.1002/fam.1055.
- (3) B.B. Hallac, A.J. Ragauskas, Analyzing cellulose degree of polymerization and its relevancy to cellulosic ethanol, *Biofuels, Bioprod. Biorefining.* 5 (2011) 215–225. doi:10.1002/bbb.269.
- (4) J.C.F. Walker, *Primary Wood Processing: Principles and practice*, 2nd ed., Springer Netherlands, 2006. doi:10.1007/1-4020-4393-7.
- (5) H. Yang, R. Yan, H. Chen, D.H. Lee, C. Zheng, Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis, *Fuel.* 86 (2007) 1781–1788. doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013.
- (6) L. Lowden, T. Hull, Flammability behaviour of wood and a review of the methods for its reduction, *Fire Sci. Rev.* 2 (2013) 4. doi:10.1186/2193-0414-2-4.
- (7) R.H. White, M.A. Dietsberger, *Wood Products : Thermal Degradation and Fire*, *Encycl. Mater. Sci. Technol.* 48 (2001) 9712–9716.
- (8) R.G. Stanley, Extractives of wood, bark, and needles of the southern pines., *For. Prod. J.* 19 (1969) 50–56.
- (9) R.H. White, Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood, *Wood Fiber Sci.* 19 (1987) 446–452.
- (10) M. Müller-Hagedorn, H. Bockhorn, L. Krebs, U. Müller, A comparative kinetic study on the pyrolysis of three different wood species, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 68–69 (2003) 231–249. doi:10.1016/S0165-2370(03)00065-2.
- (11) H. Yang, R. Yan, H. Chen, C. Zheng, D.H. Lee, D.T. Liang, Influence of mineral matter on pyrolysis of palm oil wastes, *Combust. Flame.* 146 (2006) 605–611. doi:10.1016/j.combustflame.2006.07.006.
- (12) T. Hosoya, H. Kawamoto, S. Saka, Cellulose-hemicellulose and cellulose-lignin interactions in wood pyrolysis at gasification temperature, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 80 (2007) 118–125. doi:10.1016/j.jaap.2007.01.006.
- (13) K. Raveendran, A. Ganesh, K.C. Khilar, Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics, *Fuel.* 74 (1995) 1812–1822. doi:10.1016/0016-2361(95)80013-8.
- (14) T. Hosoya, H. Kawamoto, S. Saka, Pyrolysis behaviors of wood and its constituent polymers at gasification temperature, *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 78 (2007) 328–336. doi:10.1016/j.jaap.2006.08.008.