

SELECCIÓN DE UN MÉTODO PARA PRODUCIR CARBÓN ACTIVADO UTILIZANDO CUATRO ESPECIES FORESTALES

Jhon Fredy Herrera Builes¹; Wilmar Alexander Morales Yepes² y
Juan David Pérez Schile³

RESUMEN

*La presente investigación se realizó en los laboratorios de Carbones y de Productos Forestales, de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Ésta se orientó hacia la selección de un método para obtener carbón activado a partir de las especies forestales pino pátula (***Pinus patula***), chingalé (***Jacaranda copaia***), pino tecunumani (***Pinus tecunumanii***) y roble (***Quercus humboldtii***). Cada una de las maderas se caracterizó, determinando sus propiedades físicas de densidades y contracciones.*

Se experimentaron siete métodos; activación química, activación químico – física con CO₂, activación químico – física con CO₂ y vapor de agua, activación químico – física con vapor de agua, activación física con CO₂, activación físico con vapor de agua y activación física con CO₂ y vapor de agua. Las variables que se estudiaron fueron el tiempo de residencia y la temperatura.

Tomando como parámetro el índice de yodo se seleccionó el método de activación químico – física con vapor de agua, obteniéndose índices de yodo, por encima de 800 para todas las especies estudiadas, a excepción del roble que solo alcanzó 764, que aun es aceptable para el tratamiento de aguas.

Palabras claves: Activación, índice de yodo, pátula, tecunumani, chingalé, roble.

ABSTRACT

SELECTION OF A METHOD TO PRODUCE ACTIVATED CHARCOAL USING FOUR FOREST SPECIES.

*This investigation was conducted in the Coal and of Forest Products Laboratory of the Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. It was oriented towards the selection of a method to obtain activated carbon from the following forest species; pino pátula (***Pinus patula***), chingalé (***Jacaranda copaia***), pino tecunumani (***Pinus tecunumanii***) and roble (***Quercus humboldtii***). The wood of each was characterized determining their physical properties of density and contraction.*

¹ Instructor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A. A. 568. Medellín, Colombia. <jfherrera@unalmed.edu.co>

² Ingeniero Químico, Estudiante de Maestría en Materiales. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Minas. A. A. 1027. Medellín, Colombia <wamoraley@unalmed.edu.co.>

³ Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín. Facultad de Minas. A. A. 1027. Medellín, Colombia. <jdperez@unalmed.edu.co.>

Seven different methods were tested; chemical activation, chemical-physical activation with CO₂, chemical-physical activation with CO₂ and water vapor; chemical-physical activation with water vapor; physical activation with CO₂; physical activation with water vapor, and physical activation with CO₂ and water vapor. The variables studied were residence time and temperature.

Taking as a parameter the iodine index, the chemical-physical activation with water vapor was selected, obtaining an iodine index of over 800 for all the species studied, with the exception of roble that only attained 764, which is still acceptable for water treatment.

Key words: Activation, iodine index, pátula, tecunumani, chingalé, roble.

INTRODUCCIÓN

La demanda internacional de carbón activado es creciente siendo la madera el principal precursor utilizado para su producción. Ésta es una oportunidad para el aprovechamiento de los recursos forestales en Colombia, que han sido utilizados en forma desintegrada, aprovechándose para elementos estructurales en la construcción, construcción de muebles y plantas de pulpa sin contemplar una utilización adecuada de los productos secundarios que fundamentalmente se han destinado a la producción de carbón de leña.

El carbón activado es un material de origen biológico de amplia estructura porosa, con grandes propiedades adsorptivas; se utiliza principalmente en el tratamiento de aguas residuales, purificación azucareras, la industria cosmética y la producción de fármacos. La presente investigación apunta a aumentar el rendimiento económico, la productividad y el valor agregado de los productos forestales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipo utilizado para la activación. El proceso de activación fue realizado en tres hornos verticales cilíndricos marca OVELMA, de 220 V y 800 W de potencia cada uno, de una pulgada de diámetro interno y 45 cm de largo. Los tres tenían la misma configuración para pruebas paralelas, donde eran introducidas las probetas de madera dentro de un portamuestra de acero inoxidable 316 de ½ pulgada de diámetro interno y con acoples para la entrada de gas; en este caso el gas activante es CO₂ ó CO₂ saturado con agua y para las activaciones químicas se hacía pasar N₂ como gas inerte. El tren de recorrido de los gases, que partían de cilindros, uno de 25 kg para CO₂ y otro de 6,5 m³ de N₂, pasaba a través de un horno que contenía viruta de cobre para eliminar las posibles trazas de oxígeno en los gases. Cada horno contaba con medidores de flujos (rotámetros entre 0 – 1000 ml/min) y un sistema de saturación que constaba de un termóstato en cuyo interior habían tres burbujeadores (para cada horno) en los cuales se saturaba el CO₂ con vapor de agua a 75°C (para el caso de activación física o química con esta combinación activante) (Figura 1).

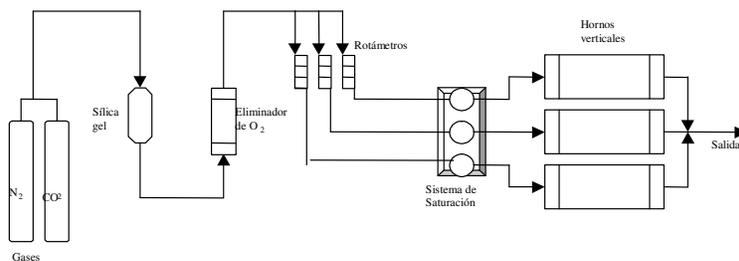


Figura 1. Esquema del montaje experimental para la activación de carbón a partir de especies forestales.

Selección de las muestras en el campo. Se siguió la norma 458 de la Comisión Panamericana de Normas Técnicas (COPANT), 1972. Esta norma evita el efecto de borde para obtener una muestra representativa de especímenes sanos y de las diferentes partes del árbol. Se utilizaron tres árboles por especie, de los cuales se seleccionaron las tres primeras trozas de 2,50 metros de largo desde su base.

Propiedades físicas. Para la obtención de las probetas en cada uno de los ensayos, se tomó una probeta o pedazo de madera de 3 cm x 3 cm x 10 cm de cada una de las trozas, para obtener un total de 9 probetas por ensayo.

Para las propiedades físicas de la madera se trabajó en tres etapas: madera verde, con una humedad por encima del 30%; madera en estado seco al aire, con una humedad del 14%, para ello se sometieron las muestras a un secado natural, dejándolas al aire libre protegidas del sol y la lluvia y madera seca al horno, con una humedad cercana al 0%, lo cual se logró sometiendo las probetas a secado en una mufla a 103°C por tiempo de 24 horas.

Para hallar las diferentes densidades se procedió a pesar y establecer el volumen mediante el método de inmersión en agua destilada de las probetas para cada uno de los tres estados; luego se calculó la densidad mediante las formulas:

DMV = peso de la madera verde / volumen de la madera verde.
DMSA = peso de la madera seca al aire / volumen de la madera seca al aire.
DMSH = peso de la madera seca al horno / volumen de la madera seca al horno.
DB = peso de la madera seca al horno/volumen de la madera verde
DMV = densidad de la madera en estado verde.
DMSA = densidad de la madera en estado seco al aire.
DMSH = densidad de la madera en estado seca al horno.
DB = densidad básica.

Para determinar las contracciones normales, se procedió de la siguiente forma; se midieron en 9 probetas las diferentes caras de la madera (radial, tangencial y longitudinal) con contenido de humedad por encima del 30%, las cuales son para dicho ensayo las “medidas verdes”, después de someterlas al secado al aire libre se volvieron a medir las mismas caras, siendo estas las “medidas secas al aire” y con estos datos se realizó el siguiente cálculo para cada una de las caras de las probetas:

$$\text{Contracción} = (\text{medida verde} - \text{medida seca al aire} / \text{medida verde}) * 100$$

Para cuantificar las contracciones totales, se procedió de la siguiente forma, se midieron en otras 9 probetas las diferentes caras de la madera (radial, tangencial y longitudinal) con contenido de humedad por encima del 30%, las cuales son para dicho ensayo las “medidas verdes”, después de someterlas al secado en la mufla se volvieron a medir las mismas caras, siendo estas las “medidas secas al horno” y con estos datos se realizó el siguiente cálculo para cada una de las caras de las probetas:

$$\text{Contracción} = (\text{medida verde} - \text{medida seca al horno} / \text{medida verde}) * 100$$

Todos los ensayos se realizaron de acuerdo a la metodología señalada en las normas establecidas por COPANT (1983). Se hizo un análisis estadístico mediante un diseño completamente al azar, haciendo uso del programa Statgraphics. La información se procesó teniendo como base la metodología descrita por Gómez (1989).

Para la obtención de las muestras se utilizaron 20 tablas de 2,5 centímetros de espesor, 9 cm de ancho y 120 cm de largo, de cada una de las especies forestales *Pinus patula* (pino pátula), *Pinus tecunumanii* (pino tecunumani), *Jacaranda copaia* (pino chingalé) y *Quercus humboldtii* (roble).

Una vez preparadas las tablas, se seleccionaron al azar dos testigos por especie, los cuales correspondieron a una muestra del 10%. A estos se les determinó el contenido de humedad inicial, tomando de cada una de las tablas una submuestra de 2,5 cm (a los 15 cm de sus extremos). Se realizó a esta medida para evitar encontrar un contenido de humedad menor, debido a que la madera seca más rápido en el sentido longitudinal; con ello se obtuvo mediante el método de secado en estufa, el contenido de humedad inicial de las tablas de madera.

Se estableció después un apilado de la madera en el horno experimental; donde se ubicaron las tablas separadas entre sí por listones de madera, en dirección paralela con respecto al flujo del viento.

Se aplicó para cada una de las maderas de las especies forestales el horario de secado catalogado como severo (Tabla 1) propuesto por la Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC) (1989), el cual consiste en variar las condiciones de humedad relativa y temperatura dentro de una cámara de secado, a medida que va disminuyendo la humedad del madera que se encuentra dentro de esta; con el cual se dejaron las maderas con una humedad final del 10%.

Tabla 1. Condiciones para el secado de las maderas empleadas para producir carbón activado a partir de especies forestales.

| Contenido de humedad (%) | Temperatura (°C) | Humedad relativa (%) |
|--------------------------|------------------|----------------------|
| > 60 | 60 | 80 |
| 60 - 50 | 65 | 70 |
| 50 - 40 | 70 | 70 |
| 40 - 30 | 75 | 50 |
| 30 - 20 | 80 | 40 |
| < 20 | 80 | 35 |

Luego de ser secados los materiales, se procedió a dimensionar probetas de cada una de las tablas de 1 cm de ancho, 1 cm de espesor y 9,5 cm de largo, para todas las especies forestales.

Activación. De acuerdo a las metodologías propuestas en la revisión de literatura para seleccionar el mejor método de activación para las maderas de las especies forestales investigadas, se experimentaron siete métodos, los cuales se describen a continuación.

Química. Las probetas de las maderas de cada una de las especies forestales, fueron previamente impregnadas con ácido fosfórico al 85 % (tipo industrial) durante una hora y 48 horas a temperatura ambiente. Posteriormente se sometieron a un proceso de pretratamiento a 170°C por 30 minutos, con flujo del gas inerte de nitrógeno en el montaje experimental de lecho fijo horizontal; transcurrido este tiempo se activó, cada una de las maderas, variando la temperatura y tiempo de activación. Las temperaturas utilizadas fueron 400°C y 500°C con tiempos de media hora y una hora. También se realizaron activaciones a 800°C, por media hora, sin ningún pretratamiento.

Químico - física con CO₂. Las probetas de las maderas de cada una de las especies forestales, fueron previamente impregnadas con ácido fosfórico al 85 % (tipo industrial) durante una hora a temperatura ambiente. Después se sometieron a un proceso de pretratamiento a 170°C por media hora, con flujo de

CO₂ ; transcurrido este tiempo se varió para cada una de las maderas las condiciones de temperatura y tiempo de activación, en 400°C por media hora y para 500°C por media hora.

Además se realizaron activaciones con temperaturas de 300°C por un tiempo de cuatro horas y 800°C durante media hora, en madera tratada con impregnación de ácido fosfórico durante una hora a temperatura ambiente.

Químico - física con CO₂ y vapor de agua. Las probetas de las maderas de cada una de las especies forestales, fueron previamente impregnadas con ácido fosfórico al 85 % (tipo industrial) durante una hora a temperatura ambiente. Luego se sometieron a un pretratamiento a 170°C por media hora, con flujo de CO₂ ; transcurrido ese tiempo se varió para cada una de las maderas la temperatura final en 400°C por media hora bajo flujo de CO₂ saturado con vapor de agua.

También se realizaron activaciones con temperaturas de 500°C por un tiempo de una hora; 700°C durante cuarenta minutos y 800°C media hora, todos en madera tratada con impregnación de ácido fosfórico durante una hora a temperatura ambiente.

Químico - física con vapor de agua. Las probetas de las maderas de cada una de las especies forestales, fueron previamente impregnada con ácido fosfórico durante una hora a temperatura ambiente. Posteriormente se sometieron a un pretratamiento a 170°C por media hora, con flujo del gas inerte de nitrógeno saturado con vapor de agua; transcurrido ese tiempo se varió para cada una de las maderas la temperatura final en 400°C por media hora. Se realizaron adicionalmente activaciones con temperatura de 800°C por un tiempo de media hora con el mismo flujo de Nitrógeno saturado con vapor de agua.

Física con CO₂. Las probetas se sometieron a 170°C por 30 minutos, con flujo de CO₂ ; transcurrido ese tiempo se varió para cada una de las maderas la temperatura final en 400°C por media hora. Se realizaron adicionalmente activaciones con temperatura de 800 °C por un tiempo de media hora con el mismo flujo de CO₂ .

Física con vapor de agua. Las probetas se sometieron a un proceso de activación con temperatura de 800°C por un tiempo de media hora con flujo de nitrógeno saturado con vapor de agua.

Física con CO₂ y vapor de agua. Las probetas se sometieron a un proceso de activación con temperatura de 800°C por un tiempo de media hora con flujo de CO₂ saturado con vapor de agua.

Al material obtenido se le caracterizó su porosidad, mediante los métodos denominados índice de yodo, azul de metileno y número de melaza. Todos los anteriores análisis se realizaron de acuerdo a la metodología señalada en las normas establecidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (1998).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas. La determinación de las propiedades mecánicas se realizó en condición seco al aire (Contenido de humedad 12%). Los resultados para cada uno de los ensayos de cada una de las especies se presentan en las Tablas 2 a 5, bajo el siguiente esquema:

$$\begin{array}{cc} X & \pm q \\ K & n \\ CV & \end{array}$$

donde:

- X: promedio
 $\pm q$: intervalo de confianza al 95 %
 K: número de árboles ensayados
 n: número de probetas
 Cv: coeficiente de variación

Tabla 2. Propiedades físicas de la madera de la especie forestal pino pátula (*Pinus patula*).

| Contenido de humedad (%) | Densidad verde (g/cm ³) | Densidad seca al aire (g/cm ³) | Densidad anhidra (g/cm ³) | Densidad básica (g/cm ³) |
|--|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 11,69 ± 0,78 | 0,95 ± 0,037 | 0,53 ± 0,037 | 0,49 ± 0,036 | 0,42 ± 0,033 |
| 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| 1,46 | 8,69 | 11,57 | 12,29 | 12,38 |
| Contracción normal (%) (Verde - seco al aire) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| 3,74 ± 4,51 | 1,8 ± 3,06 | 0,05 ± 0,03 | 5,54 ± 0,52 | |
| 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| 15,87 | 23,86 | 12,87 | 11,23 | |
| Contracción total (%) (Verde - seco horno) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| 7,76 ± 7,63 | 4,26 ± 3,51 | 0,19 ± 0,11 | 11,26 ± 0,69 | |
| 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| 8,91 | 20,40 | 42,10 | 8,37 | |

De acuerdo a estos resultados obtenidos (densidad anhidra 0,49 g/cm³) y teniendo en cuenta la clasificación de la ASTM; se puede apreciar que la madera de la especie forestal pino pátula se ubicó dentro del grupo de las medianamente pesadas con una densidad anhidra que oscila entre 0,46 – 0,75 g/cm³.

Tabla 3. Propiedades físicas de la madera de la especie forestal chingalé (*Jacaranda copaia*).

| Contenido de humedad (%) | Densidad verde (g/cm ³) | Densidad seca al aire (g/cm ³) | Densidad anhidra (g/cm ³) | Densidad básica (g/cm ³) |
|--|-------------------------------------|--|---------------------------------------|--------------------------------------|
| 11,31 ± 6,32 | 0,66 ± 0,045 | 0,37 ± 0,043 | 0,35 ± 0,044 | 0,32 ± 0,042 |
| 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 |
| 24,07 | 10,91 | 18,38 | 20,00 | 20,94 |
| Contracción normal (%) (Verde - seco al aire) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| 5,33 ± 2,99 | 2,94 ± 1,19 | 0,04 ± 0,03 | 8,13 ± 6,24 | |
| 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 |
| 41,65 | 68,80 | 17,50 | 21,52 | |
| Contracción total (%) (Verde - seco horno) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| 6,83 ± 5,18 | 3,72 ± 1,88 | 0,24 ± 0,50 | 10,81 ± 7,77 | |
| 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 | 3 6 |
| 23,00 | 27,04 | 33,30 | 26,73 | |

En la tabla anterior se evidencia con base en los resultados de densidad anhidra $0,35 \text{ g/cm}^3$ y teniendo en cuenta la clasificación de la ASTM; que la madera de la especie forestal chingalé se ubica dentro del grupo de las livianas con una densidad anhidra baja que oscila entre $0,31 - 0,45 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 4. Propiedades físicas de la madera de la especie forestal pino tecunumani (*Pinus tecunumanii*).

| Contenido de humedad (%) | Densidad verde (g/cm^3) | Densidad seca al aire (g/cm^3) | Densidad anhidra (g/cm^3) | Densidad básica (g/cm^3) |
|--------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| $12,02 \pm 0,63$ | $0,95 \pm 0,028$ | $0,57 \pm 0,024$ | $0,48 \pm 0,066$ | $0,42 \pm 0,063$ |
| 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| 1,35 | 2,84 | 9,47 | 11,39 | 13,69 |
| Contracción normal (%) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| (Verde - seco al aire) | $2,81 \pm 3,56$ | $1,60 \pm 8,16$ | $0,05 \pm 0,02$ | $4,48 \pm 0,32$ |
| | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| | 12,27 | 13,25 | 11,37 | 10,25 |
| Contracción total (%) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| (Verde - seco horno) | $6,35 \pm 6,89$ | $3,16 \pm 2,54$ | $0,29 \pm 0,25$ | $9,21 \pm 0,74$ |
| | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| | 9,39 | 20,18 | 22,20 | 9,17 |

De acuerdo a los resultados anteriores (densidad anhidra $0,48 \text{ g/cm}^3$) y teniendo en cuenta la clasificación de la ASTM; se puede apreciar que la madera de la especie forestal pino tecunumani se ubica dentro del grupo de las medianamente pesadas con una densidad anhidra que oscila entre $0,46 - 0,75 \text{ g/cm}^3$.

Tabla 5. Propiedades físicas de la madera de la especie forestal roble (*Quercus humboldtii*).

| Contenido de humedad (%) | Densidad verde (g/cm^3) | Densidad seca al aire (g/cm^3) | Densidad anhidra (g/cm^3) | Densidad básica (g/cm^3) |
|--------------------------|------------------------------------|---|--------------------------------------|-------------------------------------|
| $12,09 \pm 0,59$ | $0,99 \pm 0,059$ | $0,76 \pm 0,036$ | $0,68 \pm 0,018$ | $0,63 \pm 0,056$ |
| 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| 2,66 | 6,14 | 10,34 | 11,36 | 10,69 |
| Contracción normal (%) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| (verde - seco al aire) | $2,73 \pm 1,54$ | $1,63 \pm 2,16$ | $0,09 \pm 0,02$ | $3,90 \pm 0,82$ |
| | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| | 11,36 | 12,84 | 15,37 | 14,53 |
| Contracción total (%) | Tangencial | Radial | Longitudinal | Volumétrica |
| (verde - seco horno) | $4,36 \pm 5,64$ | $3,78 \pm 2,54$ | $0,13 \pm 0,18$ | $8,13 \pm 0,56$ |
| | 3 9 | 3 9 | 3 9 | 3 9 |
| | 3,52 | 16,12 | 25,14 | 9,17 |

Para las propiedades físicas de la maderas de la especie forestal roble, se observa con base en los resultados arrojados de la densidad anhidra 0,68 g/cm³ y con la clasificación de la ASTM; dicha madera se ubica dentro del grupo de duras o pesadas con una densidad anhidra alta que oscila entre 0,76 – 1,0 g/cm³.

Para seleccionar el mejor método de activación para las maderas de acuerdo a las metodologías propuestas en la literatura; se experimentaron siete métodos cuyos resultados y análisis se presentan a continuación.

Activación. Inicialmente se analizó el efecto de los tratamientos en las diferentes especies y luego la eficacia de cada método. Como índice de referencia se utiliza un nivel de 500, en el índice de yodo, como valor mínimo para que un carbón activado tenga algún valor comercial.

Respuesta de las especies. En los resultados obtenidos a partir de la madera pino pátula, (Tabla 6); se observa que para el método de activación química con una impregnación previa de la madera con ácido fosfórico por una hora y aplicación de temperatura de 170°C por media hora, no se dieron resultados satisfactorios; el índice de yodo estuvo por debajo de 400. El pretratamiento con una impregnación previa de la madera con ácido fosfórico por 48 horas, arrojó un índice de yodo (505), alcanzando el mínimo comercial; sin aparente pérdida de peso.

Con el método de activación químico-físico con CO₂ para el pino pátula, se observa que para las diferentes condiciones (temperatura y tiempo), no se alcanzaron los mínimos índices de yodo comerciales; algunos incluso muy bajos como en las de 300°C y 4 horas con 287 de índice; y 800°C y 0,5 horas de 232.

Tabla 6. Índices de yodo y pérdida de peso del carbón obtenido a partir de la madera de la especie forestal pino pátula (*Pinus patula*).

| Activación | Muestra | Temperatura (°C) | Tiempo (horas) | Índice de yodo (mgI ₂ /g) | Pérdida de peso (%) |
|--|---------|------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------|
| Química (impregnado 1 hora) | 1 | 170-400 | 0,5 | 394 | 24,58 |
| Química (impregnado 1 hora) | 2 | 170-400 | 1,0 | 359 | 35,82 |
| Química (impregnado 1 hora) | 3 | 170-500 | 0,5 | 370 | 31,45 |
| Química (impregnado 1 hora) | 4 | 170-500 | 1,0 | 282 | 34,93 |
| Química (impregnado 48 horas) | 5 | 170-400 | 0,5 | 505 | 0,00 |
| Química | 6 | 800 | 0,5 | 365 | 56,21 |
| Químico – física CO ₂ | 7 | 170-400 | 0,5 | 438 | 22,23 |
| Químico – física CO ₂ | 8 | 170-500 | 0,5 | 421 | 44,14 |
| Químico – física CO ₂ | 9 | 300 | 4,0 | 287 | 16,78 |
| Químico – física CO ₂ | 10 | 800 | 0,5 | 232 | 49,49 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 11 | 170-400 | 0,5 | 360 | 48,28 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 12 | 500 | 1,0 | 331 | 54,37 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 13 | 700 | 0,5 | 409 | 67,29 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 14 | 800 | 0,5 | 720 | 69,59 |
| Químico – física con vapor | 15 | 170-400 | 0,5 | 402 | 26,87 |
| Químico – física con vapor | 16 | 800 | 0,5 | 750 | 67,76 |
| Física CO ₂ | 17 | 170-400 | 0,5 | 140 | 77,78 |
| Física vapor | 18 | 800 | 0,5 | 495 | 86,88 |
| Física C O ₂ y vapor | 19 | 800 | 0,5 | 487 | 82,64 |

Aplicando el método de activación químico-físico con CO₂ y vapor de agua, se evidencia en el pino pátula una mejor respuesta bajo la condición de operación a 800°C durante media hora, con reporte de índices de yodo de 720; lo que no sucede con las otras condiciones que no superan los 400 de índice de yodo.

El método de activación químico-físico con vapor de agua aplicado en el pino pátula, para una temperatura de 800°C durante media hora, reporta resultados de un índice de yodo de 750 y con una pérdida de peso muy baja; lo que se considera un resultado aceptable desde el punto de vista comercial.

Entre tanto las activaciones físicas con CO₂, y físicas con CO₂ y vapor de agua, arrojaron resultados inferiores a los comerciales.

La activación física con vapor de agua, para el pino pátula apenas alcanza el mínimo índice de yodo comercial; pero con un pérdida de peso de más del 80%, que no lo hace atractivo económicamente.

En la Tabla 7, se observan los resultados obtenidos para el carbón de la madera de pino tecunumani; se evidencia que para los procesos de activación química; activación químico-física con CO₂; activación física con CO₂, activación física con CO₂ y vapor de agua y activación física con vapor; se obtuvieron resultados poco atractivos para todas las combinaciones de operación, con valores en la mayoría muy inferiores al índice comercial de 500.

Las activaciones con los métodos químico-física con CO₂ y vapor de agua y químico-física con vapor de agua, mostraron los mejores resultados en la condición de operación 800°C y 0.5 hora. La aplicación del método químico-físico con vapor de agua, arroja índice de yodo 757 y la activación químico-física con CO₂ y vapor de agua 594.

Tabla 7. Índices de yodo y pérdida de peso del carbón obtenido a partir de la madera de la especie forestal pino tecunumani (*Pinus tecunumanii*).

| Método | Muestra | Temperatura (°C) | Tiempo (horas) | Índice de yodo (mgI ₂ /g) | Pérdida de peso (%) |
|--|---------|------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------|
| Química | 1 | 170-400 | 0,5 | 403 | 21,58 |
| Química | 2 | 170-400 | 1,0 | 381 | 8,34 |
| Química | 3 | 170-500 | 0,5 | 357 | 38,28 |
| Química | 4 | 170-500 | 1,0 | 293 | 47,70 |
| Química (impregnado 48 horas) | 5 | 170-400 | 0,5 | 355 | 31,12 |
| Química | 6 | 800 | 0,5 | 308 | 25,69 |
| Químico – física CO ₂ | 7 | 170-400 | 0,5 | 448 | 12,13 |
| Químico – física CO ₂ | 8 | 170-500 | 0,5 | 451 | 27,97 |
| Químico – física CO ₂ | 9 | 300 | 4,0 | 320 | 14,41 |
| Químico – física CO ₂ | 10 | 800 | 0,5 | 304 | 63,66 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 11 | 170-400 | 0,5 | 319 | 47,52 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 12 | 500 | 1,0 | 380 | 33,39 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 13 | 700 | 0,5 | 457 | 67,74 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 14 | 800 | 0,5 | 594 | 64,93 |
| Químico – física con vapor | 15 | 170-400 | 0,5 | 446 | 26,62 |
| Químico – física con vapor | 16 | 800 | 0,5 | 757 | 70,08 |
| Física CO ₂ | 17 | 170-400 | 0,5 | 136 | 77,94 |
| Física vapor | 18 | 800 | 0,5 | 491 | 86,75 |
| Física CO ₂ y vapor | 19 | 800 | 0,5 | 470 | 87,31 |

Los resultados obtenidos para la madera de chingalé, se presentan en la Tabla 8; en la cual se observa que el método de activación química tanto para las condiciones de pretratamiento, así como de 800°C y 0.5 hora, no mostraron resultados satisfactorios comercialmente.

En la activación químico-física con CO₂ tampoco se logró obtener buen índice de yodo, ya que en todas las condiciones experimentadas se obtuvieron índices por debajo de 500.

En cuanto a la activación químico-física con CO₂ y vapor de agua, se observa para la madera de chingalé que los mejores resultados de índice de yodo se obtienen con la condición de operación 500°C y 1 hora (514) y 800°C y 0.5 hora (562), las demás con valores muy inferiores en sus índices de yodo. A los métodos de activación física con CO₂; activación física con vapor de agua y activación física con CO₂ y vapor de agua, no se obtuvo respuesta

El mejor método de activación que se encontró fue el de la activación químico-física con vapor de agua, con índice de yodo de 685; que es atractivo comercialmente.

Tabla 8. Índices de yodo y pérdida de peso del carbón obtenido a partir de la madera de la especie forestal chingalé (*Jacaranda copaia*).

| Método | Muestra | Temperatura (°C) | Tiempo (horas) | Índice de yodo (mgI ₂ /g) | Pérdida de peso (%) |
|--|---------|------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------|
| Química | 1 | 170-400 | 0,5 | 382 | 41,78 |
| Química | 2 | 170-400 | 1,0 | 336 | 28,38 |
| Química | 3 | 170-500 | 0,5 | 335 | 50,69 |
| Química | 4 | 170-500 | 1,0 | 328 | 43,39 |
| Química (impregnado 48 horas) | 5 | 170-400 | 0,5 | 464 | 4,26 |
| Química | 6 | 800 | 0,5 | 308 | 57,06 |
| Químico – física CO ₂ | 7 | 170-400 | 0,5 | 410 | 34,57 |
| Químico – física CO ₂ | 8 | 170-500 | 0,5 | 409 | 45,47 |
| Químico – física CO ₂ | 9 | 300 | 4,0 | 283 | 17,44 |
| Químico – física CO ₂ | 10 | 800 | 0,5 | 392 | 66,62 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 11 | 170-400 | 0,5 | 353 | 37,82 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 12 | 500 | 1,0 | 514 | 29,98 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 13 | 700 | 0,5 | 497 | 65,22 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 14 | 800 | 0,5 | 562 | 71,89 |
| Químico – física con vapor | 15 | 170-400 | 0,5 | 394 | 31,13 |
| Químico – física con vapor | 16 | 800 | 0,5 | 685 | 67,60 |
| Física CO ₂ | 17 | 170-400 | 0,5 | 281 | 94,06 |
| Física vapor | 18 | 800 | 0,5 | 472 | 83,73 |
| Física CO ₂ y vapor | 19 | 800 | 0,5 | 435 | 79,17 |

En la Tabla 9, se observa que para la madera de roble; solo con los métodos de activación químico-física con CO₂ y vapor de agua, y activación químico-física con vapor de agua, se obtuvieron valores de interés comercial.

En lo que respecta al método de activación física con CO₂ y vapor de agua, apenas alcanza (498) y con una pérdida de peso de más del 80% lo cual no es alentador.

Tabla 9. Índices de yodo y pérdida de peso del carbón obtenido a partir de la madera de la especie forestal roble (*Quercus humboldtii*).

| Método | Muestra | Temperatura (°C) | Tiempo (horas) | Índice de yodo (mgI ₂ /g) | Pérdida de peso (%) |
|--|---------|------------------|----------------|--------------------------------------|---------------------|
| Química | 1 | 170-400 | 0,5 | 254 | 59,90 |
| Química | 2 | 170-400 | 1,0 | 258 | 56,27 |
| Química | 3 | 170-500 | 0,5 | 243 | 65,19 |
| Química | 4 | 170-500 | 1,0 | 248 | 65,27 |
| Química (impregnado 48 horas) | 5 | 170-400 | 0,5 | 320 | 52,15 |
| Química | 6 | 800 | 0,5 | 191 | 59,03 |
| Químico – física CO ₂ | 7 | 170-400 | 0,5 | 349 | 60,30 |
| Químico – física CO ₂ | 8 | 170-500 | 0,5 | 301 | 60,80 |
| Químico – física CO ₂ | 9 | 300 | 4,0 | 174 | 31,84 |
| Químico – física CO ₂ | 10 | 800 | 0,5 | 291 | 72,82 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 11 | 170-400 | 0,5 | 180 | 59,41 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 12 | 500 | 1,0 | 275 | 68,75 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 13 | 700 | 0,5 | 366 | 72,28 |
| Químico – física CO ₂ y vapor | 14 | 800 | 0,5 | 542 | 78,37 |
| Químico – física con vapor | 15 | 170-400 | 0,5 | 218 | 62,46 |
| Químico – física con vapor | 16 | 800 | 0,5 | 510 | 73,12 |
| Física CO ₂ | 17 | 170-400 | 0,5 | 170 | 83,99 |
| Física vapor | 18 | 800 | 0,5 | 416 | 84,08 |
| Física CO ₂ y vapor | 19 | 800 | 0,5 | 498 | 85,74 |

Eficacia de cada método. Para el método de activación química al comparar los índices de yodos de los carbones obtenidos a partir de maderas (Figura 2), es claro que fue pobre el efecto de activación, reflejado en su desarrollo superficial, con la mayoría de los índices de yodo inferiores a 500; solamente el pino pátula alcanzó índices comerciales (505) sometido a un proceso de impregnación previa de 48 horas, el chingalé arrojó resultados escasos a los 500 de índices de yodo, lo que podría mejorarse con un estudio mas detallado, para esta especie.

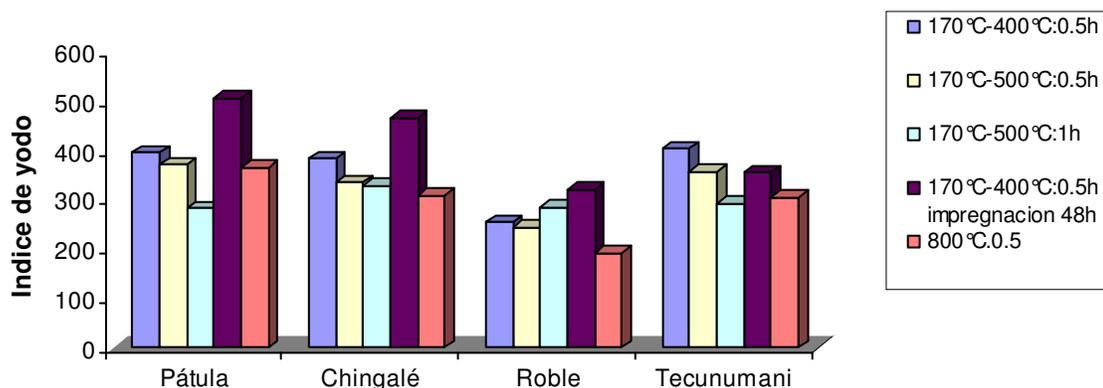


Figura 2. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación química.

Para el químico-físico con CO₂ y vapor de agua se observa pobre desarrollo superficial con una clara excepción en la condición de activación 800°C y media hora, donde se presentaron Índices de yodo superiores a 500 en todos los carbones (Figura 3).

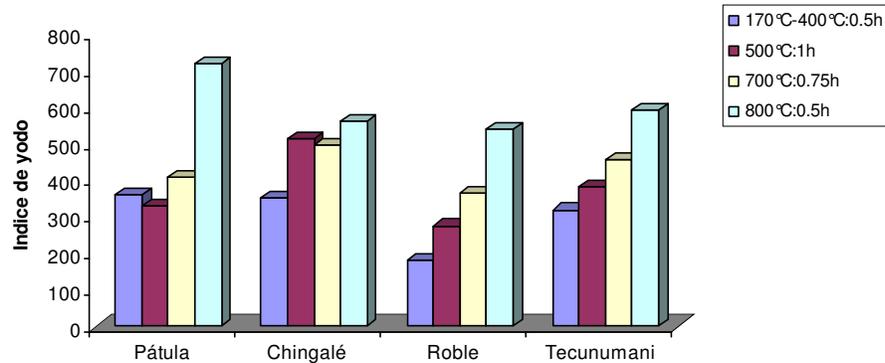


Figura 3. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación químico-físico con CO₂ y vapor de agua.

El mayor desarrollo de área superficial se encontró con el método químico - físico con vapor de agua, seleccionado para la optimización, evidenciando índices de yodo mayores para las especies en general (Figura 4).

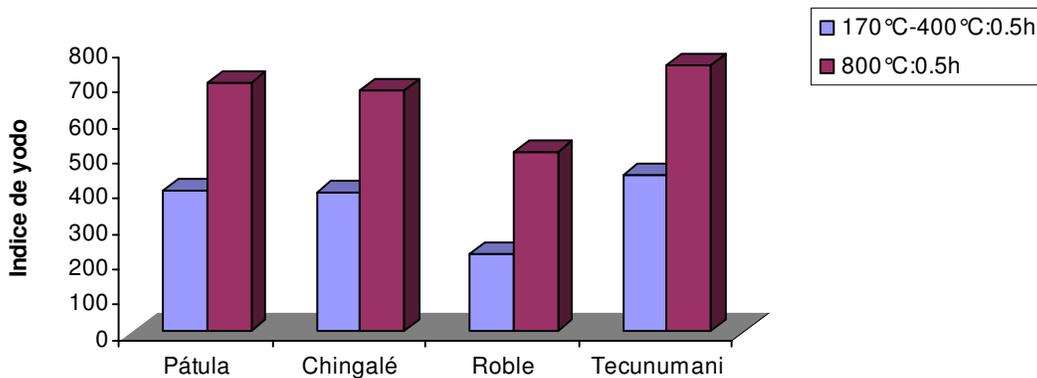


Figura 4. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación químico-física con vapor de agua.

Ninguno de los siguientes métodos superó el índice de yodo de 500 para las diferentes condiciones de operación Químico - físico con CO₂ (Figura 5), activación física con CO₂ (Figura 6), activación física con vapor de agua (Figura 7), físico con CO₂ y vapor de agua (Figura 8).

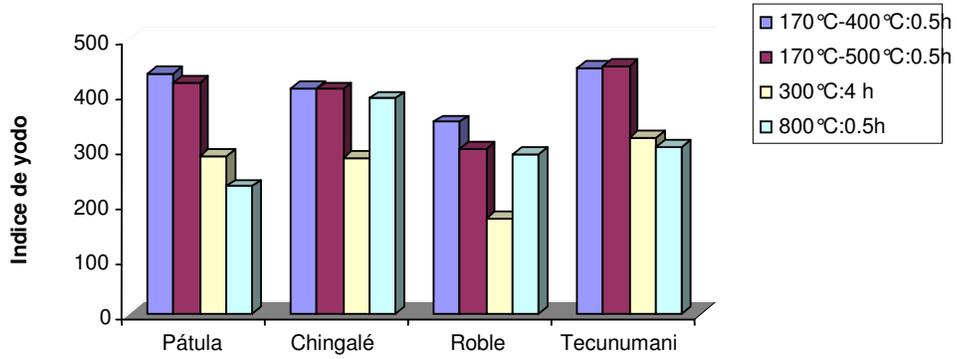


Figura 5. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación químico-físico con CO₂.

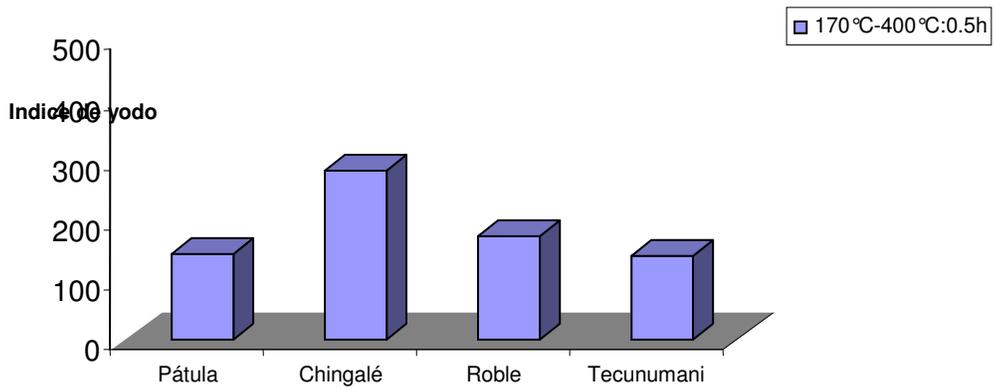


Figura 6. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación física con CO₂.

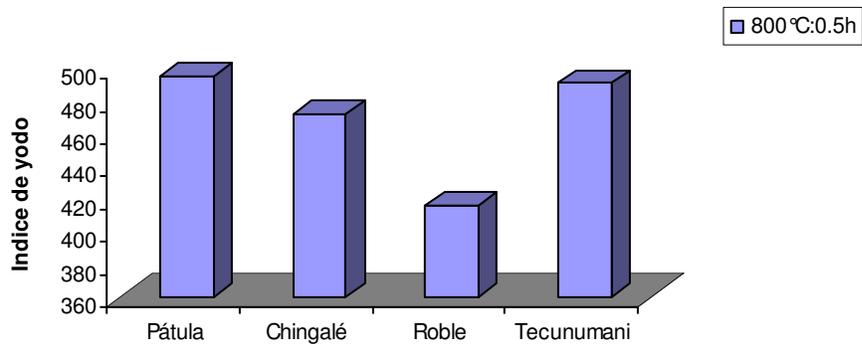


Figura 7. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación física con vapor de agua.

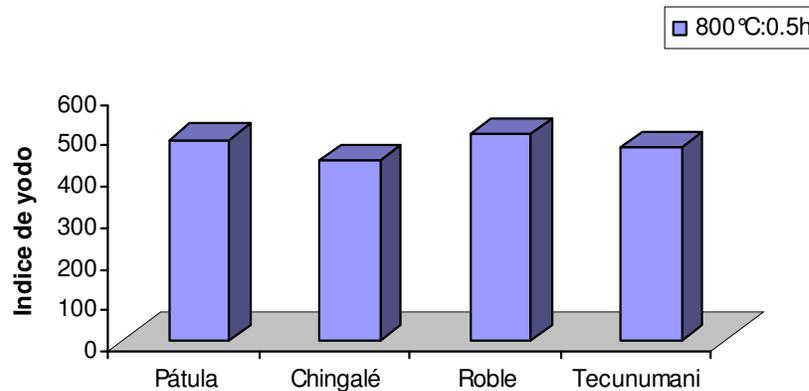


Figura 8. Índices de yodo obtenidos, en maderas de especies forestales, mediante el método de activación física con CO₂ y vapor de agua.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos existe una clara correlación entre los carbones activados y cada especie forestal estudiada. Maderas con densidades altas requieren para el proceso de activación temperaturas altas y tiempo de residencia de activación mayor; en relación con maderas de densidades desde bajas a medianas, las cuales requieren menor temperatura.

El comportamiento mostrado por el método de activación química con impregnación previa de las maderas con ácido fosfórico durante 48 horas, presentó un excelente rendimiento que estuvo por encima del 90% y con índices de yodo de nivel comercial, en las especies forestales pino pátula (*Pinus patula*) y chingalé (*Jacaranda copaia*), a temperaturas de activación bajas.

En cuanto al método de activación químico-física con CO₂ y vapor de agua, todas las especies superaron el índice de yodo mínimo comercial (500), evidenciando el mejor resultado en la madera de la especie forestal pino pátula (*Pinus patula*).

La activación mediante el método físico con vapor de agua, solo alcanza los niveles mínimos comerciales de índices de yodo en todas las maderas, a alta temperatura; presentando bajos rendimientos que las hace poco atractivas para su aplicación industrial.

Los carbones obtenidos de las maderas de pino pátula, pino tecunumani y chingalé pueden ser usados como decolorante de jarabes simples, azúcar líquido y en aplicaciones que requieren alta velocidad de filtración y tratamiento de aguas.

Una de las grandes bondades del tratamiento con ácido fosfórico en las maderas de las especies forestales investigadas, es la baja pérdida de peso.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede pensar en la posibilidad utilizar los desechos industriales de la madera para la obtención de carbón activado para el mercado nacional e Internacional. Podría utilizarse parte, también como el generador del calor necesario para el proceso productivo, con lo cual se podría tener un producto final de bajo costo de producción.

Estos resultados son de un impacto positivo, a nivel forestal , debido a que aportan solución a la generación de desechos, constituyendo una oportunidad para aumentar la productividad de dichas especies, en forma sustentable, representando un valor agregado para los productos secundarios del bosque.

BIBLIOGRAFÍA

COMISIÓN PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. Normas COPANT. Buenos Aires: La Comisión, 1972. 354 p.

_____ Normas COPANT. Buenos Aires: La Comisión, 1983. 584 p.

GÓMEZ, Hernán. Estadística experimental con aplicaciones a las ciencias agrícolas. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 1989. 615 p.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Manual del Grupo Andino para el secado de maderas. Lima: JUNAC, 1989. 430 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Carbón activado método de ensayo. En: Normas Técnicas Colombianas. N 4467 (1998); 60 p.