

Optimización de propiedades mecánicas y térmicas de un aglomerado sintético por el Método de Taguchi

Otimização de propriedades mecânicas e térmicas de um aglomerado sintético por o Método de Taguchi

Mechanical and thermal properties optimization of a synthetic agglomerate by using the Taguchi Method

C. M. Bedoya–Hincapié¹, P. Pineda–Gómez² y A. Rosales–Rivera³

Recepción: 17-jun-2009/Modificación: 03-nov-2009/Aceptación: 05-nov-2009
Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

En este trabajo se aplicó el modelo de Diseño Experimental de Taguchi para la optimización de las propiedades mecánicas y térmicas de un material compuesto aglomerado y obtener los parámetros más adecuados para su elaboración. La importancia del desarrollo de los aglomerados sintéticos está en el uso de desechos agrícolas para darle un empleo útil al suplir materiales de gran demanda. Se utilizaron la cáscara de arroz, arcilla, arena y gel de aloe como materias primas. Con la variación de los valores de los factores de control: porcentaje de cáscara de arroz (R), temperatura (T) y tiempo de tratamiento

¹ Ingeniera física, cbedoyah@unal.edu.co, estudiante, Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Universidad Nacional de Colombia, Manizales–Colombia.

² MSc Física, ppinedag@unal.edu.co, profesora, Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Caldas, Manizales–Colombia.

³ PhD Físico, arosalesr@unal.edu.co, profesor, Laboratorio de Magnetismo y Materiales Avanzados, Universidad Nacional de Colombia, Manizales–Colombia.

térmico (t), se realizaron las diferentes combinaciones experimentales. Para la optimización de las propiedades mecánicas y térmicas según la metodología de Taguchi, se seleccionaron de las pruebas mecánicas y térmicas: el módulo de elasticidad, la energía absorbida en el impacto, el módulo de rotura máximo y la temperatura inicial de descomposición para cada combinación experimental de aglomerado. Para el procesamiento de estos datos, se utilizó el software para el diseño automático y análisis de experimentos de Taguchi, Qualitek-4, bajo la característica de calidad mayor–mejor. Los parámetros óptimos obtenidos para cada nivel de control, fueron $R = 15\%$, $T = 120^{\circ}\text{C}$ y $t = 3$ h. Estos resultados fueron validados con la realización de un experimento confirmatorio, donde se obtuvieron, para este aglomerado, propiedades similares a las de unas especies de madera. El desarrollo de este prototipo de material alternativo será útil como sustituyente de la madera y contribuirá a la reducción del impacto ambiental generado por los productos de desecho.

Palabras claves: aglomerado, cáscara de arroz, fibras vegetales, estabilidad térmica, propiedades mecánicas.

Resumo

Este trabalho aplicou o modelo Taguchi Experimental Design para otimização das propriedades mecânicas e térmicas de um material compósito aglomerado e obter os melhores ajustes para o processamento. A importância de desenvolver aglomerados sintéticos é a utilização de resíduos agrícolas para dar emprego útil para complementar matérias de grande demanda. Utilizou-se casca de arroz, argila, areia e aloe gel como matérias-primas. Com a mudança nos valores dos fatores de controle: a porcentagem de casca de arroz (R), temperatura (T) e tempo de tratamento térmico (t), houve diferentes combinações experimentais. Para otimização das propriedades mecânicas e térmicas de acordo com a metodologia do Taguchi, foram selecionados a partir de ensaios mecânicos e térmicos: o módulo elasticidade, a energia absorvida no impacto, o módulo máximo de ruptura e a temperatura inicial de decomposição para cada combinação experimental reconstituído. Para processamento desses dados, o software foi utilizado para desenho automático e análise de experimentos Taguchi, Qualitek-4 em característica de maior qualidade melhor. Os parâmetros ótimos obtidos para cada nível de controle foram de $R = 15\%$, $T = 120^{\circ}\text{C}$ e $t = 3$ h. Estes resultados foram validadas através da realização de um experimento de confirmação, onde obtivemos para esta placa de partícula, como propriedades de alguns espécies de madeira. O desenvolvimento deste material alternativo protótipo será substituinte útil como madeira e contribuir para reduzir o impacto ambiente gerado pelos resíduos.

Palavras chaves: aglomere, casca de arroz, fibra vegetal, estabilidade térmica, propriedades mecânicas.

Abstract

In this work, the experimental design of Taguchi model was applied in order to obtain the most appropriate parameters to elaborate an agglomerate material which presents a good mechanical and thermal behavior. The raw materials used were rice husk, common clay, sand and aloe gel. The importance of the development of the synthetic agglomerates is in the use of agricultural wastes to give them an useful employment when replacing materials of great demand. The experimental combinations were done varying the control factors values: rice husk percentage (R), temperature (T) and thermal treatment time (t). Via to the optimization properties according Taguchi's Methodology, the elasticity modulus, the absorbed energy in the impact, break maximum module and initial decomposition temperature to each experimental combination were selected. The Qualitek-4 software was used below the biggest the better quality characteristic. The optimum parameters obtained to each control level were: $R = 15\%$, $T = 120^\circ\text{C}$ and $t = 3$ h. These results were confirmed with a new experiment, where similar properties to the wood species were obtained. The developing of this will be useful as substitute of the wood and could improve the environment impact due residual materials.

Key words: agglomerate, rice husk, vegetable fibers, thermal stability, mechanical properties.

1 Introducción

Las fibras naturales orgánicas poseen el potencial de actuar como materiales reforzantes biodegradables en la obtención de materiales compuestos, hecho que ha generado gran impacto en la última década por sus efectos positivos sobre la agricultura, ambiente y economía [1, 2]. Las fibras como rellenos naturales implican un bajo costo, baja densidad, degradabilidad y reciclabilidad [3]. Uno de los residuos agrícolas que puede ser potencialmente usado como reforzante o relleno de materiales poliméricos es la cáscara de arroz [3]. Este es el residuo presente en mayor cantidad en la industria molinera [4] constituyendo más de un 10% de la producción mundial de arroz [5]. Por su baja densidad (122 kg/m^3), su procesamiento, transporte, almacenamiento e incineración, tienen un manejo complejo [6]. El desarrollo de materiales compuestos o aglomerados ha dado un valor agregado a este residuo en aplicaciones de construcción [7, 8]. Con este propósito en 2005, V. M. Castaño y colaboradores, desarrollaron con resina y cáscara de arroz un material denominado

Aglomerado ignífugo, el cual no absorbe la humedad (hidrofóbico) y resiste altas temperaturas (ignífugo) [9]. Igualmente en el año 2007, R. Montesdeoca generó un material con cáscara de arroz, arena y resina llamado Acero Vegetal, caracterizado por sus satisfactorias propiedades mecánicas y térmicas, y adecuado para la fabricación de artículos de madera y casas prefabricadas [10]. En 2008, R. Salgado elaboró un material denominado Material Compuesto Celulósico de Cáscara de arroz, con el fin de detener la tala inmoderada de árboles y utilizar materiales alternativos en la elaboración de muebles y divisiones en paredes [11]. Las propiedades físicas de estos materiales dependen de parámetros como las condiciones de procesamiento, contenido de fibra y adhesión matriz-fibras [7, 12, 13, 14]. Por tal motivo, es útil emplear un método de diseño experimental que tome en cuenta las variables del sistema y sus niveles de variación. Uno de los más estudiados es el Método de Taguchi [15, 16, 17]. Éste se basa en un Diseño estadístico de experimentos empleando características de calidad Señal/Ruido (S/R) mayor-mejor, menor-mejor y nominal-mejor, de acuerdo a la función deseada de un material o producto. El propósito de esta metodología es minimizar la causa de variación sobre las características deseadas del material, al hacer una adecuada elección de las variables y niveles de control.

El presente trabajo tiene como finalidad desarrollar un prototipo de material compuesto aglomerado con base en productos del eje cafetero (Colombia) como cáscara de arroz, arcilla, arena y gel de aloe, de tal manera que sus propiedades mecánicas y térmicas se acerquen a las de la madera tipo Sajo, Ciprés, Machare o Nogal Cafetero. Cada una de estas materias primas aporta una característica en particular al aglomerado. La cáscara da un bajo peso y aumento en su resistencia mecánica por el cruzamiento de fibras, dependiendo de su cantidad y tamaño de partícula [3]; la arcilla proporciona resistencia térmica por su propiedad de refractariedad; la arena aporta un aumento en su resistencia mecánica y el gel de aloe suministra cohesividad al aglomerado. Se empleó la característica mayor-mejor para incrementar el desempeño mecánico y térmico del aglomerado. Se evaluaron como propiedades mecánicas la resistencia al impacto, flexión y compresión, y como propiedad térmica, la estabilidad térmica. El diseño y desarrollo del material se logró con base en el Método de Taguchi.

2 Desarrollo Experimental

La cáscara de arroz, obtenida en un invernadero localizado en la región del eje cafetero, fue seleccionada y almacenada en bolsas herméticas. Sus dimensiones fueron 9–10 mm de longitud y 2,0–2,5 mm de grosor. La arcilla usada, clase comercial, se analizó con una prueba de granulometría y de contenido de humedad (prueba de límites) para verificar su calidad. Así mismo la arena empleada fue arena para revoque refinada en un tamiz N°60 (250 μm diámetro de partícula), con el fin de alcanzar un tamaño de grano homogéneo; y el gel de aloe se obtuvo por extracción de la planta de aloe, especie *Aloe barbadensis*. Con base en el Método Taguchi, la metodología elegida en el proceso de diseño y elaboración del material se apoyó en el empleo de tres factores de controlables con tres niveles y, por lo tanto, la realización de nueve condiciones experimentales para la obtención de las muestras.

Mediante la realización de pruebas piloto se seleccionaron los factores (de control y de ruido) que influyen en la optimización del material a elaborar y sus niveles de variación según lo exige el Método de Taguchi. Se eligieron tres factores de control: porcentaje de cáscara de arroz (R), temperatura (T) y tiempo de tratamiento térmico (t), con tres niveles de variación 15, 10 y 5%; 200, 160 y 120°C; y 4, 3 y 2 h, respectivamente (tabla 1). Los factores con sus niveles fueron organizados en un arreglo L9 (tabla 2), que indica nueve combinaciones experimentales a realizar. Además, se seleccionaron, de acuerdo con las condiciones ambientales del sitio de trabajo, dos factores de ruido: humedad (R_1) y temperatura ambiental (R_2) con dos niveles: 80 y 83%; y 18 y 20°C, respectivamente (tabla 3), dispuestos en un arreglo L4 (tabla 4)). Se elaboraron las combinaciones indicadas en la tabla 2, en las cuales se midieron los parámetros que ayudaran a su optimización. Se escogieron como propiedades a optimizar la resistencia a compresión, flexión, e impacto, y la estabilidad térmica del aglomerado, mediante sus respectivos parámetros de optimización: módulo de elasticidad, módulo de rotura máximo, energía absorbida en el impacto y temperatura inicial de descomposición. Para el procesamiento de los parámetros obtenidos en cada combinación experimental, se usó un software de análisis experimental, en el que cada una de las combinaciones experimentales interactúa con los factores de ruido. Esto permitió determinar los valores de la relación S/R para cada factor de control, es decir, evaluar el efecto que tienen sobre estos, los factores de ruido. Los mayores valores de S/R obteni-

dos para cada factor de control, indicaron los niveles más adecuados para el procesamiento del material.

Tabla 1: niveles de experimentación de los factores de control

Factores de Control	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
R: Porcentaje de cáscara de arroz (%)	15	10	5
T: Temperatura de tratamiento térmico (°C)	200	160	120
t: Tiempo de tratamiento térmico (h)	4	3	2

Tabla 2: condiciones experimentales (L9)

N°	R	T	t
1	1	1	1
2	2	1	2
3	3	1	3
4	1	2	3
5	2	2	1
6	3	2	2
7	1	3	2
8	2	3	3
9	3	3	1

Tabla 3: niveles de experimentación de los factores de ruido

Factores de Ruido	Nivel 1	Nivel 2
R₁: Humedad ambiental (%)	80	83
R₂: Temperatura ambiental (°C)	18	20

Tabla 4: combinaciones de los factores de ruido (L4)

N°	R ₁	R ₂
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Las muestras fueron elaboradas artesanalmente con la cáscara de arroz sin tratamiento térmico, mezclando las materias primas por un tiempo de 30 minutos a temperatura ambiente (18–20°C). Después se realizó un proceso de secado, utilizando un horno marca Binder con rango de operación de 0–300°C. Posterior al tratamiento térmico, las muestras se almacenaron en un desecador para evitar la absorción de humedad y acelerar su proceso de enfriamiento. Se prepararon tres diferentes probetas A, B y C (con triplicado) de cada combinación experimental, conforme a los requerimientos para los ensayos mecánicos: rectangular (A–ensayo de flexión), cuadrada (B–ensayo de impacto) y cilíndrica (C–ensayo de compresión), con dimensiones 2,5 cm × 2,5 cm × 20 cm, 11 cm × 11 cm × 1 cm, y 1,7 cm × 3,4 cm, respectivamente (ver figura 1). Por último, las muestras se almacenaron en bolsas plásticas herméticas hasta la realización de las pruebas mecánicas.

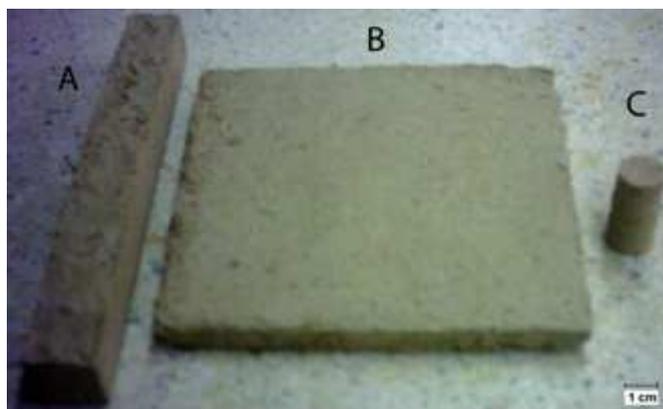


Figura 1: geometría de las tres muestras utilizadas en cada prueba mecánica

Los ensayos mecánicos se basaron en la norma ASTM D 1037–99 [18] para materiales fibrosos debido a la presencia de fibras insolubles en la cáscara de arroz (celulosa, lignina y hemicelulosa). Para el ensayo de compresión se usó una prensa multiusos sistematizada, bajo una celda de carga de 50 kN a una velocidad constante de 2,8 mm/s. Este equipo también fue utilizado en el ensayo de flexión, con dos puntos de apoyo y otro mediante el cual se le aplicó una carga puntual de 5 kN a una velocidad constante de 1,4 mm/s. La prueba de impacto se ejecutó empleando un balón de acero de 0,593 kg y

un soporte de madera en cuya base se ubicó arena pasada por un tamiz N°4 (4,75 mm). Del mismo modo, la prueba de análisis térmico fue realizada con la técnica de termogravimetría (TGA) usando el equipo Q 500 TA Instruments. Las muestras fueron pulverizadas y sometidas a rampas de calentamiento con velocidad de 10°C/min, en un programa de temperatura convencional entre 25–800°C y una atmósfera inerte de nitrógeno. La masa de la muestra utilizada fue de 10±0,1 mg.

3 Resultados y análisis

A las nueve muestras se les efectuaron las pruebas mecánicas (compresión, flexión e impacto) y térmicas (análisis termogravimétrico-TGA). En la tabla 5, se muestran los resultados para el módulo de elasticidad (m.e), el módulo de rotura máximo (m.r.m.), la energía absorbida en el impacto (e.a) y la temperatura inicial de descomposición (T.i).

Tabla 5: Resultados de los ensayos mecánicos y prueba térmica

N°	m.e	e.a.	m.r.m	T.i
1	157,550 ± 0,51	1,5981 ± 0,20	12,21 ± 0,40	235 ± 0,10
2	165,050 ± 0,45	1,3076 ± 0,25	13,45 ± 0,43	241 ± 0,10
3	154,342 ± 0,50	1,0169 ± 0,30	10,23 ± 0,35	255 ± 0,10
4	207,910 ± 0,42	2,3245 ± 0,19	9,38 ± 0,36	265 ± 0,10
5	311,104 ± 0,53	2,1793 ± 0,20	17,85 ± 0,39	260 ± 0,10
6	335,913 ± 0,40	1,1623 ± 0,31	19,75 ± 0,30	270 ± 0,10
7	207,910 ± 0,57	2,7604 ± 0,18	16,09 ± 0,33	260 ± 0,10
8	316,084 ± 0,47	2,3246 ± 0,20	11 ± 0,45	256 ± 0,10
9	388,005 ± 0,38	1,3076 ± 0,33	21,23 ± 0,35	264 ± 0,10

El módulo de elasticidad se encontró de la pendiente de la curva esfuerzo–deformación en el ensayo de compresión (ver figura 2(a)). Este módulo mostró valores entre 154,342–388,005 kg/cm², los cuales fueron similares al módulo reportado para especies madereras secas como Sajo, Cipres, Machare y Nogal Cafetero, analizadas perpendicularmente a sus fibras [19] (ver tabla 6). Se observó que el aumento en el porcentaje de cascarilla conlleva a una mayor elasticidad del material en el rango estudiado. No obstante, su disminución

hace que el material muestre rigidez, debido a que esta situación facilitó una mejor adhesión entre los componentes de la mezcla. García et al. [3] y Le Digabel et al. [12] reportaron un aumento en el módulo de elasticidad en estos materiales, con el incremento del porcentaje de fibra y la realización a esta de un tratamiento químico, lo que favorece la adhesión fibras–matriz. Los altos módulos de elasticidad fueron registrados para las muestras 4, 5 y 6, realizadas a 160°C, y para las combinaciones 7, 8 y 9 efectuadas a la temperatura de 120°C. Caso contrario ocurre con la muestras 1, 2 y 3, realizadas a 200°C. Esto indica, que el efecto de altas temperaturas para el procesamiento del aglomerado durante un tiempo prolongado, es la producción de fisuras y reducción al mínimo de la humedad contenida en la muestra, lo cual está vinculado a una mayor posibilidad de falla. Cabe anotar que en este trabajo no se realizó tratamiento químico a la fibra, con el objeto de conocer su mínima influencia en el comportamiento mecánico debido a su adhesión.

Tabla 6: módulo de elasticidad y de rotura máximo perpendicular a las fibras de algunas especies madereras secas [19]

N°	M.e (kg/cm ²)	M.r.m (kg/cm ²)
Sajo	202	7506
Ciprés	295	3487
Machare	349	11043
Nogal Cafetero	422	7968

Así mismo, las combinaciones del aglomerado mostraron una baja resistencia a flexión, manifestada en el módulo de rotura máximo obtenido de la curva de fuerza en función de la deflexión máxima (ver figura 2(b)). En ésta se presentó la mejor respuesta para la combinación 9. Comparando los módulos de rotura máximos de las combinaciones experimentales con los de las especies Sajo, Cipres, Machare y Nogal cafetero (tabla 6), difieren a causa de las características del aglomerado como orden aleatorio de sus fibras y alta porosidad del material, característica de estos tipos de materiales [20]. Estos factores hacen que haya una alta probabilidad de falla si el material se dispone en la configuración de viga.

En la prueba de impacto, según el tipo de falla, se hicieron tres observaciones de fisuración: leve, notoria o total. Se seleccionó la observación fisuración

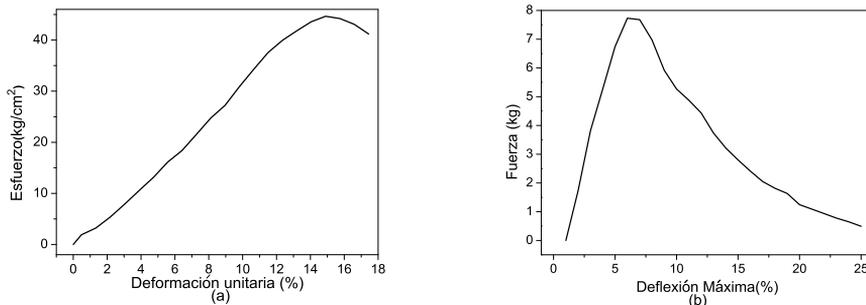


Figura 2: curvas para la combinación experimental de aglomerado N°7: (a) curva de esfuerzo deformación y (b) curva de flexión

leve para el estudio de la energía absorbida por el material. La energía absorbida fue calculada como el cambio en la energía potencial de un balón de acero al caer. Se observó que las muestras toleraban alturas entre 17,5–47,5 cm antes de mostrar la fisuración leve. Las combinaciones con el más alto porcentaje de cascarilla de arroz (15 %) pertenecientes a las muestras 1, 4 y 7 mostraron el mejor comportamiento en esta prueba. Esto evidencia que las fibras favorecen la absorción de energía durante el impacto debido a su carácter aleatorio, lo cual hace que el aglomerado tenga una mayor tolerancia para soportar dichas cargas.

En las pruebas de análisis térmico realizadas a las materias primas se estableció la estabilidad térmica de cada componente. También se analizaron cada una de las combinaciones de aglomerado, para evaluar el efecto de las materias primas sobre su estabilidad térmica. Estos resultados se presentan en la figura 3(a). En ésta, el gel de aloe presentó una pérdida del 97 % (aproximado) de su peso a 110°C, señalando el agua como su principal componente. La cáscara de arroz mostró tres zonas de descomposición. La primera en $T \leq 110^\circ\text{C}$, por la liberación de agua fisisorbida, la segunda debida al inicio de la degradación de la lignina y hemicelulosa ($T \approx 205^\circ\text{C}$) [21] y la tercera, al comienzo de descomposición de la celulosa ($T \approx 350^\circ\text{C}$). Los rangos de tratamiento térmico seleccionados para el aglomerado mostrados en la tabla 1 ($T \leq 200^\circ\text{C}$), se deben al valor de inicio de la descomposición para la cáscara de arroz ($T \approx 205^\circ\text{C}$). La arcilla, por su parte, exhibió dos zonas de pérdida de peso,

la inicial por la salida de un 13 % de agua (aproximadamente) y la siguiente, por la degradación de las láminas arcillosas ($T \approx 400^\circ\text{C}$). La arena ostentó un comportamiento térmicamente estable, lo que indica su composición no orgánica (SiO_2).

En el análisis térmico de los aglomerados, los termogramas mostrados fueron típicas curvas de celulosa, comprendidas por tres zonas de descomposición (figura 3(b)). En su etapa inicial se observó una pérdida de peso de 2 % (aproximadamente), justificando el carácter hidrofóbico del aglomerado. La temperatura inicial de degradación en el rango $235\text{--}265^\circ\text{C}$, indica una mayor estabilidad térmica en relación a la cáscara de arroz. Por encima de este rango, se reduce el comportamiento mecánico, debido al rompimiento de enlaces y degradación de la cáscara de arroz.

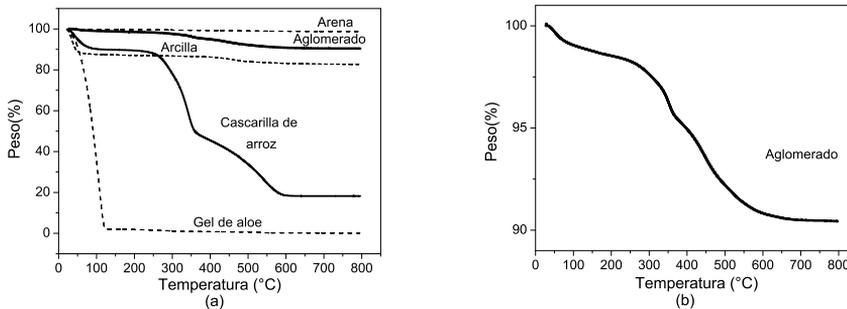


Figura 3: (a) termogramas de las materias primas y una combinación de aglomerado (N°7), y (b) termograma para la combinación experimental de aglomerado N°7

3.1 Método de Taguchi

La combinación óptima del aglomerado se estableció con base en los siguientes resultados: módulo elasticidad, módulo de rotura máximo, energía absorbida en el impacto y temperatura inicial de descomposición, conforme a la tabla 5. Estos datos fueron procesados mediante el software de análisis experimental de Taguchi, Qualitek–4, bajo la característica de calidad mayor–mejor, la cual se identifica por la relación S/R dada por (1). Esta relación proporciona la

respuesta del experimento, siendo una medida del grado de variación en una prueba cuando se presentan factores de ruido [22].

$$\frac{S}{R} = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2}, \quad (1)$$

donde S es la desviación, R es el ruido o causa de variación de las características a optimizar, n es el número de resultados en una prueba y Y los resultados. En el procesamiento de los datos, mediante el software establecido, se obtuvo la distribución de los datos ajustados a la característica de calidad con los valores de la media de los resultados (\bar{M}), la desviación (S) y las relaciones S/R (ecuación 1) para cada combinación experimental (tabla 7).

Tabla 7: media (\bar{M}), desviación (S) y relación S/R para cada combinación

N°	\bar{M}	S	S/R
1	1620,75	2915,559	6,001
2	71	109,395	24,835
3	909,75	1466,602	5,994
4	110,5	102,259	29,025
5	50,75	79,348	5,969
6	108,25	119,842	11,997
7	889,5	1575,164	24,863
8	586	838,953	12,021
9	98,5	111,548	29,402

Así mismo, se obtuvieron los valores de la señal S/R para cada uno de los factores: R (porcentaje de cáscara de arroz), T (temperatura de tratamiento térmico) y t (tiempo de tratamiento térmico) en sus tres niveles, mostrados en la figura 4, en la cual se da información de los niveles más aptos para el procesamiento del material. Estos se seleccionaron para los mayores valores de la relación S/R : 15% de cáscara de arroz (nivel 1 del factor R), 120°C de temperatura de tratamiento térmico (nivel 3 del factor T) y 3 horas de tiempo de tratamiento térmico (nivel 2 del factor t). Estos valores de niveles corresponden a la combinación experimental N°7 (tabla 8).

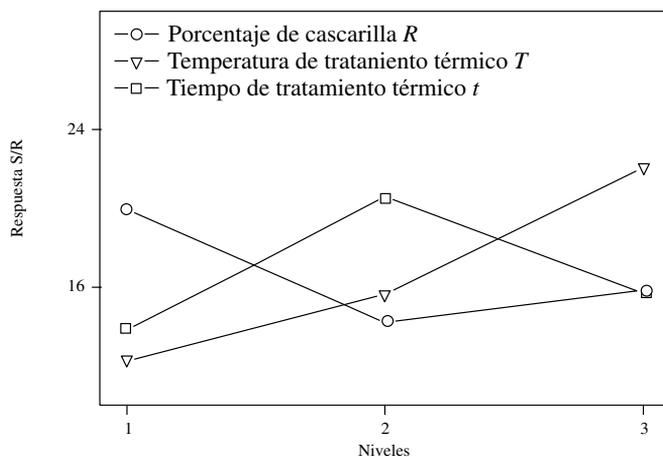


Figura 4: niveles óptimos de los factores de control

Tabla 8: combinación óptima en el diseño y elaboración del material aglomerado

Factores de control	Nivel	Valor
R	1	15 %
T	3	120°C
t	2	3 h

En la figura 4, además de la combinación óptima de niveles, se observa que el parámetro más influyente en el procesamiento del material es la temperatura de tratamiento térmico.

También, por medio del análisis de la varianza (ANOVA) se evidenció que el mayor efecto de los factores de ruido es dado por la humedad ambiental, lo cual está relacionado con la posibilidad de que el aglomerado pueda evitar la proliferación de hongos y determine el grado de resistencia del material. Se contempla el hecho de que a mayores tiempos de tratamiento térmico se podrían mejorar las propiedades físicas del aglomerado. La combinación óptima de la tabla 8, que corresponde a la combinación N°7, se verificó con la realización de un experimento confirmatorio para el cual se obtuvieron resultados similares a los obtenidos previamente. Estos son mostrados en la tabla 9.

Tabla 9: resultados previos y ensayo confirmatorio para la combinación N°7

Ensayo	m.e (kg/cm ²)	e.a (J)	m.r.m (kg/cm ²)
Combinación N°7	207,910 ± 0,57	2,7604 ± 0,18	16,97 ± 0,33
Confirmatorio	229,059 ± 0,42	2,61513 ± 0,54	12,97 ± 0,62

4 Conclusiones

Se determinaron los parámetros más adecuados para el diseño y elaboración de un material aglomerado de cáscara de arroz, arcilla, arena y gel de aloe, con la aplicación del Método de Taguchi. La combinación óptima correspondió a la muestra N°7, con parámetros de procesamiento: 15 % de cáscara de arroz (R -nivel 1), 120°C de temperatura de tratamiento térmico (T -nivel 3) y 3 h de tiempo de tratamiento térmico (t -nivel 2). El aglomerado mostró módulos de elasticidad similares a los de especies madereras Sajo, Ciprés, Machare y Nogal cafetero, cuando les es aplicada la carga en el sentido perpendicular a sus fibras. Así mismo presentó un buen comportamiento a impacto pero no a flexión, no siendo adecuado para su uso como viga. Los factores más influyentes en la elaboración del material fueron la temperatura de tratamiento térmico y la humedad ambiental.

5 Agradecimientos

Los autores agradecen a la Dirección Nacional de Investigaciones y a la DIMA por su apoyo financiero para la realización de este trabajo, en el semillero de investigación titulado "Diseño y producción de un polímero sintético obtenido a partir de la cascarilla arroz y análisis de sus propiedades mecánicas y térmicas".

Referencias

- [1] A. P. Kumar and R. P. Singh. *Biocomposites of cellulose reinforced starch: Improvement of properties by photo-induced crosslinking*. Bioresource Technology, ISSN 0960-8524, **99**(18), 8803-8809 (2008). Referenciado en 157

- [2] Y. Lei, Q. Wu, F. Yao and Y. Xu. *Preparation and properties of recycled HD-PE/natural fiber composites*. Composites. Part A, Applied science and manufacturing, ISSN 1359–835X, **38**(7), 1664–1674 (2007). Referenciado en 157
- [3] D. García, J. López, R. Balart, R. A. Ruseckaite and P. M. Stefani. *Composites based on sintering rice husk-waste tire rubber mixtures*. Materials and Design, ISSN 0261–3069, **28**(7), 2234–2238 (2007). Referenciado en 157, 158, 163
- [4] L. T. Vlaev, I. G. Markovska and L. A. Lyubchev. *Non-isothermal kinetics of pyrolysis of rice husk*. Thermochemica Acta, ISSN 0040–6031, **406**(1-2), 1–7 (2003). Referenciado en 157
- [5] K. G. Satyanarayana, G. G. C. Arizaga and F. Wypych. *Biodegradable composites based on lignocellulosic fibers: An overview*, Progress in Polymer Science, ISSN 0079–6700, **34**(9), 982–1021 (2009). Referenciado en 157
- [6] J. Werther, M. Saenger, E-U. Hartge, T. Ogada and Z. Siagi. *Combustion of agricultural residues*. Progress in Energy and Combustion Science, ISSN 0360–1285, **26**(1), 1–27 (2000). Referenciado en 157
- [7] A. K. Bledzki and J. Gassan. *Composites reinforced with cellulose based fibres*. Progress in Polymer Science, ISSN 0079–6700, **24**(2), 221–274 (1999). Referenciado en 157, 158
- [8] S. Kim. *Incombustibility, physico-mechanical properties and TVOC emission behavior of the gypsum-rice husk boards for wall and ceiling materials for construction*. Industrial crops and products, ISSN 0926–6690, **29**(2-3), 381–387 (2009). Referenciado en 157
- [9] Victor Castaño. Sugestec: Sistema Universitario de Gestión Tecnológica, http://www.sugestec.unam.mx/sugestec/galeria_1.jsp?clave=39, abril de 2009. Referenciado en 158
- [10] El nuevo empresario, http://www.elnuevoempresario.com/noticia_827_manabita-creo-el-acero-vegetal.php, febrero de 2009. Referenciado en 158
- [11] René Salgado Delgado. *La cascarilla de arroz: Un excelente sustituto de la madera*. Hypatia: Revista de Divulgacion Científico–Tecnológica del Gobierno del Estado de Morelos, 11, 2004. Referenciado en 158
- [12] F. Le Digabel and L. Avérous. *Effects of lignin content on the properties of lignocellulose-based Biocomposites*. Carbohydrate Polymers, ISSN 0144–8617, **66**(4), 537–545 (2006). Referenciado en 158, 163
- [13] L. Dányádi, T. Janecska, Z. Szabó, G. Nagy, J. Móczó and B. Pukánszky. *Wood flour filled PP composites: Compatibilization and adhesion*. Composites Science and Technology, ISSN 0266–3538, **67**(13), 2838–2846 (2007). Referenciado en 158

- [14] B. S. Ndazi, S. Karlsson, J. V. Tesha and C.W. Nyahumwa *Chemical and physical modifications of rice husks for use as composite panels*. Composites. Part A, Applied science and manufacturing , ISSN 1359-835X, **38**(3), 925–935 (2007). Referenciado en 158
- [15] M. Joseph Davidson, K. Balasubramanian and G. R. N. Tagore. *Experimental investigation on flow-forming of AA6061 alloy-A Taguchi approach*. Journal of materials processing technology, ISSN 0924–0136, **200**(1–3), 283–287 (2008). Referenciado en 158
- [16] C. Hu, Y. Chang, L. Yin, C.Tsao and C.Chang. *Optimal design of nickel-coated protein chips using Taguchi approach*. Sensors and actuators B Chemical, ISSN 0925–4005, **108**(1–2), 665–670 (2005). Referenciado en 158
- [17] L. S. I Jorba. *El secreto de la calidad japonesa: El diseño de experimentos clásicos, Taguchi y Shainin*, ISBN 84–267–0913–3, Barcelona, Marcombo, 1993. Referenciado en 158
- [18] ASTM International. *Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Material*. D 1037–99, 141–171 (2006). Referenciado en 161
- [19] F. Mejía Fernández. *Propiedades físicas y mecánicas de especies maderables en Caldas para su uso en la construcción, incluyendo la guadua*. Universidad Nacional de Colombia, Manizales (1985). Referenciado en 162, 163
- [20] B. Madsen, A. Thygesen and H. Lilholt. *Plant fibre composites - porosity and stiffness*. Composites Science and Technology, ISSN 0266–3538, **69**(7–8), 1057–1069 (2009). Referenciado en 163
- [21] K. G. Mansaray and A. E. Ghaly. *Thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere*. Bioresource Technology, ISSN 0960–8524, **65**(1-2), 13–20 (1998). Referenciado en 164
- [22] P. J. Ross. *Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design*, ISBN 0 07–053866–2. McGraw–Hill, United States (1988). Referenciado en 166