

## Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

### Optimization of mechanical properties of a synthetic agglomerate by response surface methodology.

Rogelio Antonio Canul Piste <sup>1</sup>

Emilio Pérez Pacheco <sup>2</sup>

Carlos Rolando Ríos Soberanis <sup>3</sup>

Mario Adrián de Atocha Dzul Cervantes <sup>4</sup>

Alejandro Ortiz Fernández <sup>5</sup>

#### RESUMEN

La optimización de propiedades mecánicas de aglomerados sintéticos utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es un enfoque eficaz para optimizar formulaciones y procesos. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo, fue el implementar un Diseño Central Compuesto (DCC) en conjunto con una MSR para la predicción de las propiedades mecánicas a flexión de un aglomerado sintético a base de poli(ácido láctico) (PLA) reforzado con fibras naturales obtenidas de la palma de coco (*Cocus nucifera* L). Para ello, se tomó en cuentas las siguientes variables independientes: A: longitud de fibra (mm), B: concentración de aglutinante (%), C: temperatura de termoformado (°C) y D: presión de termoformado (kPa). Como variable de respuesta se propuso el módulo elástico a flexión estática (R1). Para el procesado de los datos se utilizó el software Design-Expert 7.0.0. La combinación de los niveles codificados para los factores independientes, el cual maximiza a la variable de respuesta R1 (modulo teórico) se obtiene cuando A= -2, B= -1.88, C= -2 y D= 0.21, resultando en un módulo elástico a flexión de 474 MPa. Este resultado fue validado por medio de un experimento confirmatorio (n=5), obteniéndose un módulo elástico a flexión de 453 MPa, muy próximo a lo obtenido en el valor teórico.

**PALABRAS CLAVES:** aglomerados; aglutinante; refuerzo; propiedades mecánicas; módulo a flexión.

<sup>1</sup> Alumno de Maestría. Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní (ITESCAM). [8564@itescam.edu.mx](mailto:8564@itescam.edu.mx) <https://orcid.org/0009-0003-9505-9979>

<sup>2</sup> Profesor-Investigador. Jefatura de Ingeniería en Materiales. Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní (ITESCAM). Cuerpo Académico Bioprocesos. [eperez@itescam.edu.mx](mailto:eperez@itescam.edu.mx) <https://orcid.org/0000-0003-2242-1183>

<sup>3</sup> Profesor-Investigador. Departamento de Materiales. Centro de Investigación Científica de Yucatán. [rolando@cicy.mx](mailto:rolando@cicy.mx) <https://orcid.org/0000-0003-3915-7331>

<sup>4</sup> Profesor-Investigador. Jefatura de Ingeniería en Materiales. Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní (ITESCAM). Cuerpo Académico Bioprocesos. [maadzul@itescam.edu.mx](mailto:maadzul@itescam.edu.mx) <https://orcid.org/0000-0002-9095-7281>

<sup>5</sup> Profesor-Investigador. Jefatura de Ingeniería en Materiales. Tecnológico Nacional de México. Campus Instituto Tecnológico Superior de Calkiní (ITESCAM). Cuerpo Académico Bioprocesos. Autor para correspondencia: [aeortiz@itescam.edu.mx](mailto:aeortiz@itescam.edu.mx) <https://orcid.org/0000-0002-9689-2124>

**Fecha de recepción:** 24 de septiembre, 2024.

**Fecha de aceptación:** 23 de octubre, 2024.

## ABSTRACT

Optimization of mechanical properties of synthetic agglomerates using Response Surface Methodology (RSM) is an effective approach to optimize formulations and processes. Therefore, the objective of this work was to implement a Central Composite Design (CCD) in conjunction with an RSM for the prediction of the flexural mechanical properties of a synthetic agglomerate based on reinforced poly(lactic acid) (PLA) with natural fibers obtained from the coconut palm (*Cocos nucifera* L). To do this, the following independent variables were taken into account: A: fiber length (mm), B: binder concentration (%), C: thermoforming temperature (°C) and D: thermoforming pressure (kPa). The static bending elastic modulus (R1) was proposed as the response variable. Design-Expert 7.0.0 software was used to process the data. The combination of the coded levels for the independent factors, which maximizes the response variable R1 (theoretical module) is obtained when A= -2, B= -1.88, C= -2 and D= 0.21, resulting in a module elastic at bending of 474 MPa. This result was validated through a confirmatory experiment (n=5), obtaining an elastic flexural modulus of 453 MPa, very close to that obtained in the theoretical value.

**KEYWORDS:** binders; binder; reinforcement; mechanical properties; flexural modulus.

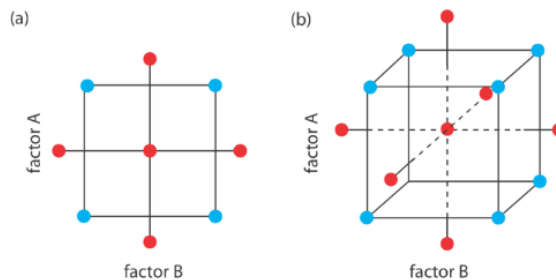
## INTRODUCCIÓN

Un Aglomerado Sintético (AS) se refiere a la unión entre un polímero sintético (matriz) mezclado con partículas, fibras u otros materiales (refuerzo) los cuales le otorgan nuevas propiedades específicas al polímero [1]. A la unión entre una matriz polimérica y un material de refuerzo se le conoce convencionalmente como material compuesto [2]. El proceso de fabricación de aglomerados sintéticos está bien estudiado y ampliamente aplicado a diversos campos industriales como la construcción [3], la automotriz [4], la náutica [5], entre muchos otros.

El PLA es una clase de matriz polimérica termoplástica, biodegradable y semicristalina con un punto de fusión relativamente alto, el cual presenta excelentes propiedades mecánicas, es fácilmente compostable y no tiene efectos negativos sobre el medio ambiente [6]. Sin embargo, el PLA tiene ciertas desventajas, que incluyen su hidrofobicidad, fragilidad a temperatura ambiente, baja resistencia térmica, tasa de degradación lenta, permeabilidad a los gases, falta de grupos activos y neutralidad química [7]. Por otro lado, a nivel mundial se generan cerca de 8 billones de Toneladas/año de biomasa lignocelulósica provenientes de actividades agroindustriales [8]. Las fibras lignocelulósicas naturales son fundamentales en el desarrollo de aglomerados debido a su sostenibilidad, propiedades mecánicas, aislamiento térmico y acústico, costo, compatibilidad, efecto estético y reducción de la huella de carbono (biodegradables) [9]. Las Fibras de Coco (FC) se distinguen de otras fibras lignocelulósicas por ser difíciles de fragmentar, soportar ataques bacterianos [10] y sobre todo, por tener un alto contenido de lignina [11], similar a la madera. Las propiedades mecánicas finales de los aglomerados sintéticos están determinadas por innumerables factores, tales como tipos y concentración de fibra, tamaño de la fibra, tipo de aglomerante (matriz), aditivos y proceso de fabricación.

**Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta**

La Metodología de Superficie de Respuesta (MSR) es una herramienta matemática muy útil para el modelado y el análisis de problemas de ingeniería [12]. Esta herramienta tiene como objetivo principal el optimizar una variable de respuesta que es influenciada por diversas variables o factores implementados durante el proceso de fabricación de un material compuesto, en este caso un aglomerado sintético. Para ello, la MSR toma en cuenta el uso de diseños de experimentos, como es el Diseño Central Compuesto (DCC). Un DCC (figura 1) comprende un subgrupo de experimentos que utilizan polinomios de primer, segundo u orden superior, los cuales tienen relación entre las variables independientes y la variable respuesta, por lo que se considera una herramienta adecuada cuando el objetivo es optimizar un proceso que se ve afectado por diversos factores.



**Figura 1. Ejemplo de un DCC para (a)  $k = 2$  y (b)  $k = 3$ . Los puntos en azul son un diseño factorial de  $2k$ , y los puntos en rojo son un diseño de estrella.**

## JUSTIFICACIÓN

La obtención de un aglomerado sintético a base de PLA reforzado con FC tiene varias justificaciones importantes: el PLA es un polímero derivado de recursos renovables con bajo porcentaje de elongación y que, al combinarlo con fibras naturales, se reduce la dependencia de materiales petroquímicos, promueve el uso de recursos sostenibles y mejora su elongación. Las fibras naturales, como las FC pueden aumentar la resistencia y rigidez del PLA, mejorando así las propiedades mecánicas del aglomerado. Esto permite desarrollar materiales más robustos que pueden ser utilizados en aplicaciones estructurales. La incorporación de FC puede disminuir la huella de carbono del PLA, ya que estas fibras suelen requerir menos energía para su descomposición en comparación con fibras sintéticas. Tanto el PLA como las FC son biodegradables, lo que significa que el aglomerado tiene un menor impacto ambiental al final de su vida útil, contribuyendo a la reducción de residuos plásticos. La investigación y desarrollo de este tipo de aglomerados pueden abrir nuevas oportunidades en el diseño y la ingeniería de productos, fomentando la innovación en el sector de materiales sostenibles. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue implementar una MSR como técnica matemática y estadística para estudiar la relación entre las variables independientes (tamaño de fibras, concentración de aglutinante, temperatura de termoformado y presión del termoformado) sobre una variable de respuesta (módulo elástico a flexión) en el proceso de preparación de aglomerados sintéticos a base de PLA/FC.

## METODOLOGÍA

### Materiales

PLA comercial tipo lineal, semicristalino (37%), una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) entre 55-65°C, una temperatura de fusión ( $T_f$ ) entre 140-150°C, una densidad de 1.24 g/cm<sup>3</sup> y una resistencia a la flexión de 485 MPa, se obtuvo de la empresa Brello, España. El material lignocelulósico (FC) se

**Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta**

obtuvo de la empresa Tierra HuertoMX, México. Las fibras fueron tratadas con NaOH 1M a 60°C por 4 horas, para mejorar la compatibilidad entre las fibras y la matriz.

**Preparación de las probetas**

Probetas rectangulares fueron elaboradas con dimensiones de 2.5 cm x 2.5 cm x 20 cm mezclando el PLA/FC bajo las condiciones experimentales de la **tabla 2**. Se elaboraron un total de 5 probetas por número de corrida (n=5). Las variables y niveles implementados para el DCC se muestran en la **tabla 1**. Los valores de las variables codificadas se determinaron en base a experimentos preliminares. La concentración de FC en las probetas se mantuvo constante al 5% w/w. El resultado obtenido para la variable de respuesta (R1) fue el valor promedio de las 5 probetas ensayadas.

**Tabla 1. Variables y niveles del DCC.**

	Variables	Unidad	Variable Codificada				
			-2	-1	0	1	2
<b>A</b>	Longitud de Fibra	mm	6	9.5	13	16.5	20
<b>B</b>	Concentración de Aglutinante	%	50	57.5	65	72.5	80
<b>C</b>	Temperatura	°C	160	175	190	205	220
<b>D</b>	Presión	kPa	10	17.5	25	32.5	40

Para los cálculos estadísticos, las variables se codifican como Xi (valor adimensional de la variable independiente), según la ecuación 1:

$$X_i = \frac{x_i - x_0}{\delta_x} \quad (1)$$

Dónde: “Xi” es el valor codificado de la variable i; “xi” es el valor sin codificar de la variable independiente; “x0” es el valor de Xi en el punto central; δx es la diferencia del cambio de nivel entre el nivel 0 y 1. Los resultados óptimos para las condiciones experimentales (DCC) se encontraron mediante la aplicación de un modelo de regresión de segundo orden según la **ecuación 2**, de la siguiente manera:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2)$$

donde “y” es la variable de respuesta prevista; “k” es el número de factores; “xi” y “xj” son las variables codificadas; “β0” es la constante del coeficiente; “βi”, “βii” y “βij” son los coeficientes de primer orden, cuadráticos y los efectos entre interacciones, respectivamente; i y j son los índices de cada uno factor; “ε” es el error residual.

**Análisis estadístico**

La tabla ANOVA, la gráfica de contorno y la gráfica de superficie de respuesta fue generada mediante el uso del software estadístico Design-Expert® 7.0.0, teniendo los siguientes atributos



## Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

experimentales: tipo de diseño (Superficie de respuesta); base del diseño (24 + estrella); características (rotable y ortogonal); variables independientes (4); variables dependientes (1); número de corridas (36) incluyendo 12 puntos centrales; grados de libertad (21); distancia axial ( $\pm 2$ ); ubicación (Aleatoria).

### Pruebas mecánicas

Las propiedades mecánicas a flexión estática (R1) de los aglomerados obtenidos en base al DCC se realizaron siguiendo la norma ASTM D1037-99 (Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials). Se empleó tres puntos de apoyo mediante el cual se le aplicó una carga puntual de 5 kN a una velocidad constante de 1.5 mm/s.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Análisis de varianza y gráfica de residuales.

Los resultados obtenidos para la variable de respuesta de acuerdo con la significancia del modelo, la estimación de los coeficientes del modelo y la significancia estadística de los factores en el modelo se obtuvieron mediante el método de mínimos cuadrados y un análisis de varianza (ANOVA) con la ayuda del paquete estadístico Design-Expert ® 7.0.0.

En la tabla 3 podemos observar los resultados obtenidos con respecto al ANOVA para las pruebas mecánicas a flexión estática de los aglomerados en base al DCC. Dicho análisis se realizó con el propósito de corroborar la significancia de la ecuación polinomial de segundo orden para los valores experimentales, facilitando la identificación de factores significativos y la optimización de la variable de respuesta. Aquellos valores de  $P < 0.05$  (valores en rojo) indican una significancia en términos del modelo y por lo tanto, se consideran estadísticamente significativos con un nivel de confianza del 95%. En este aspecto, la significancia del modelo fue  $< 0.0001$  indicando que el modelo es adecuado para predecir el comportamiento de los resultados obtenidos para la variable de respuesta (módulo a flexión). Con respecto a los efectos principales, el factor A (longitud de fibra), el factor B (concentración de aglutinante) y el factor C (temperatura de termoformado) presentaron valores de  $p < 0.05$ , por lo tanto, dichos efectos principales se consideran estadísticamente significativos en la preparación de los aglomerados. Con respecto a las interacciones entre los efectos, presentaron diferencias significativas. La interacción AB (longitud de fibra – concentración de aglutinante), la interacción AC (longitud de fibra – temperatura de termoformado) y la interacción BC (concentración de aglutinante - temperatura de termoformado), fueron los que presentaron valores de  $p < 0.05$  y por lo tanto, en dichas interacciones entre los efectos se consideran estadísticamente significativos para la preparación de los aglomerados. En el caso de los factores cuadráticos (A2, B2, C2 y D2) todos los resultados fueron estadísticamente significativos. La calidad del modelo polinómico se evalúa mediante el coeficiente de determinación, conocido como  $R^2$  y  $R^2$  ajustada. En esta investigación, el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) resultó ser de 0.9253, en otras palabras, el modelo cuadrático explica el 92.53 % de la incertidumbre original. Cuando se habla de la incertidumbre de una medida, se habla de un parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden atribuirse razonablemente al medido. Un análisis de residuos (figura 1) es una forma de medir la validez del diseño experimental. En la figura 1 se puede apreciar que los residuos presentan un comportamiento normal para las pruebas mecánicas de los aglomerados. Los puntos de datos cercanos a la línea recta confirman una normalidad e independencia de los residuos.

## Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

### Gráfica de contorno y superficie de respuesta

Una gráfica de contorno proporciona una vista bidimensional en la que están conectados todos los puntos que tienen un mismo valor de respuesta ajustada con el fin de producir líneas de contorno de respuestas constantes. Además, las gráficas de contorno se utilizan para establecer valores de respuesta y condiciones operativas deseables. La exactitud de una gráfica de contorno depende del grado en que el modelo representa las verdaderas relaciones entre las variables independientes con respecto a la variable de respuesta. En la figura 2 podemos observar la gráfica de contorno y la superficie de respuesta para la variable dependiente (R1). En el eje "X" se encuentra representado los valores codificados para el factor A (longitud de fibra), en el eje "Y" se encuentra representado los valores codificados para el factor B (concentración de aglutinante) y en el eje "Z" se encuentra representado los valores reales para la variable de respuesta R1 (módulo a flexión). Bajo estas condiciones, en la gráfica de contorno se puede apreciar que existe un área donde la longitud de la fibra (factor A) presenta un máximo con respecto al módulo de flexión, esto es entre -2 y -1 para los valores codificados y con respecto a valores reales es entre 6 y 9.5 mm de longitud de fibra. Por otro lado, se puede apreciar que para la concentración de aglutinante (factor B), presenta un máximo con respecto al módulo de flexión entre -2 y -1 para los valores codificados y con respecto a valores reales es entre 50 y 57.5 % de aglutinante.

En la figura 2, también podemos observar la gráfica de superficie de respuesta para el modelo cuadrático obtenido. Su importancia consiste en que es una gráfica de malla tridimensional que nos facilita la búsqueda de condiciones óptimas para maximizar o minimizar la respuesta de un sistema, lo que es esencial en la ingeniería y la investigación. También nos ayuda a localizar el punto óptimo en un espacio multidimensional, lo que es crucial para tomar decisiones. Al optimizar un proceso, se puede reducir costos y mejorar la eficiencia, lo que es beneficioso en la industria. Por otro lado, nos permite planificar experimentos de manera más eficiente al reducir el número de pruebas necesarias, gracias a la capacidad de predecir resultados.

En la tabla 3 se puede apreciar la ecuación matemática que representa el modelo ajustado para la variable de respuesta. Dicha ecuación nos permite estimar el valor de la variable de respuesta para diferentes valores de las variables independientes, facilitando la toma de decisiones. Nos ayuda a entender la relación entre las variables, identificando cómo cambios en las variables independientes afectan a la variable de respuesta. Facilita el análisis de tendencias en los datos, permitiendo identificar patrones a lo largo del tiempo o entre diferentes grupos. Se puede usar para probar hipótesis sobre las relaciones entre variables, aportando evidencia cuantitativa. La ecuación puede ayudar a optimizar procesos o recursos al identificar los valores de las variables independientes que maximizan o minimizan la variable de respuesta y, proporciona una forma clara y precisa de comunicar hallazgos, facilitando la comprensión de los resultados de un análisis.

### CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES

Los resultados encontrados en este estudio muestran que el valor máximo que se puede alcanzar con respecto a las propiedades mecánicas a flexión estática en este aglomerado sintético a base de PLA/FC, se encuentra entre los niveles codificados de -1 y -2 para el factor A (longitud de fibra) y B (concentración de aglutinante), manteniendo la temperatura y presión de termoformado en los valores centrales (valor codificado 0). Aunque la concentración de FC en la matriz es baja, se logró mantener valores muy cercanos a la resistencia a la flexión del PLA comercial. Por lo tanto, este aglomerado es viable de ser utilizado en distintas industrias con el propósito de aumentar el grado de degradación del PLA. Como recomendación, es importante estudiar el efecto de aumentar el porcentaje de fibras en dicha matriz para ver efecto que tiene en sus propiedades a flexión.

Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

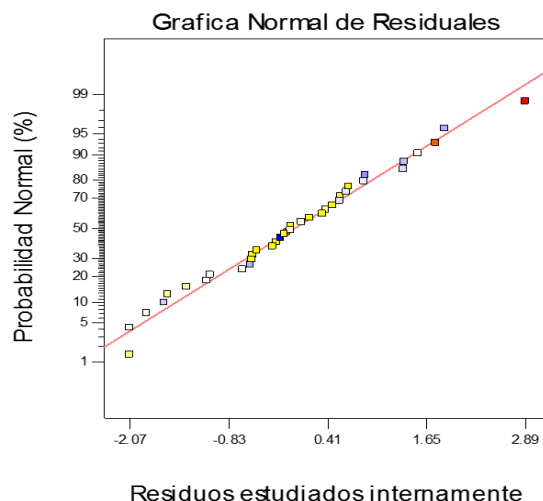


Figura 1. Gráfica normal de residuales.

Tabla 3. ANOVA para el modelo cuadrático de superficie de respuesta.

Fuente		R1
		valor-P
Significancia del Modelo		< 0.0001
Efectos Principales	A: Longitud de fibra (mm)	< 0.0001
	B: Concentración de Aglutinante (%)	0.0053
	C: Temperatura de termoformado (°C)	< 0.0001
	D: Presión de termoformado (kPa)	0.8684
Interacciones entre los efectos principales	AB: Longitud de fibra (mm) - Concentración de Aglutinante (%)	< 0.0001
	AC: Longitud de fibra (mm) - Temperatura de termoformado (°C)	0.0009
	AD: Longitud de fibra (mm) - Presión de termoformado (kPa)	0.7524
	BC: Concentración de Aglutinante (%) - Temperatura de termoformado (°C)	< 0.0001
	BD: Concentración de Aglutinante (%) - Presión de termoformado (kPa)	0.3793
	CD: Temperatura de termoformado (°C) - Presión de termoformado (kPa)	0.4545
	A <sup>2</sup> : Longitud de fibra (mm) - Longitud de fibra (mm)	< 0.0001
	B <sup>2</sup> : Concentración de Aglutinante (%) - Concentración de Aglutinante (%)	< 0.0001
	C <sup>2</sup> : Temperatura de termoformado (°C) - Temperatura de termoformado (°C)	< 0.0001
	D <sup>2</sup> : Presión de termoformado (kPa) - Presión de termoformado (kPa)	< 0.0001
Coeficiente de determinación	R <sup>2</sup>	0.9253
	R <sup>2</sup> ajustada	0.8756



Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

Tabla 2. DCC y resultados para la variable de respuesta.

Corridas	Variables codificadas				Resultado
	A	B	C	D	R1
	mm	%	°C	kPa	MPa
1	1	1	-1	-1	211.6
2	0	0	0	0	332.4
3	-1	-1	1	-1	229.6
4	2	0	0	0	218.6
5	0	0	0	0	318.5
6	0	0	0	0	310.6
7	1	1	1	1	231.0
8	1	-1	1	1	165.6
9	0	0	0	0	310.5
10	0	0	0	0	324.7
11	0	0	0	2	245.3
12	0	0	2	0	200.8
13	-1	-1	1	1	209.2
14	0	2	0	0	222.8
15	1	-1	1	-1	208.2
16	0	0	0	-2	228.4
17	-1	1	-1	-1	230.2
18	0	0	0	0	316.6
19	-1	1	1	-1	223.2
20	1	1	1	-1	230.8
21	0	0	0	0	334.4
22	1	-1	-1	1	237.2
23	0	0	0	0	311.7
24	-1	1	-1	1	227.4
25	0	0	0	0	327.9
26	-1	1	1	1	228.8
27	-1	-1	-1	-1	410.5
28	1	-1	-1	-1	215.6
29	-1	-1	-1	1	389.6
30	1	1	-1	1	219.7
31	0	0	0	0	330.5
32	0	-2	0	0	248.5
33	0	0	0	0	315.6
34	-2	0	0	0	257.3
35	0	0	0	0	320.1
36	0	0	-2	0	255.3





Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta

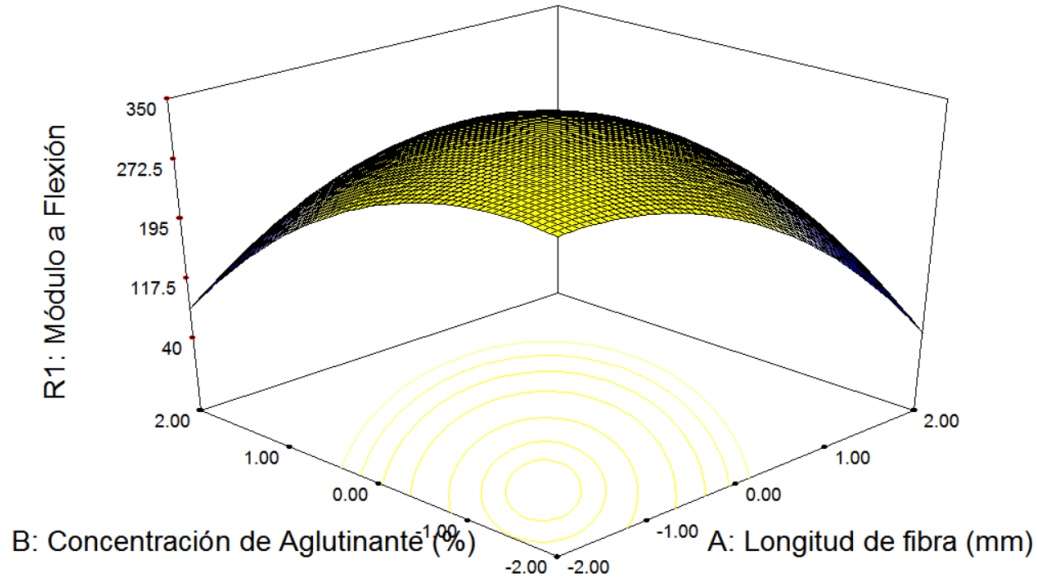


Figura 2. Gráfica de contorno y superficie de respuesta para la variable de respuesta (R1).

Tabla 3. Modelo matemático ajustado para la variable de respuesta.

Variable de Respuesta	Modelo ajustado
Módulo a Flexión Estática	$R1 = 321.125 - 21.0708*A - 13.0708*B - 21.8292*C - 0.704167*D - 19.599*A^2 + 24.7688*A*B + 19.9312*A*C + 1.64375*A*D - 20.174*B^2 + 29.1062*B*C + 4.61875*B*D - 22.074*C^2 - 3.91875*C*D - 19.874*D^2$

REFERENCIAS

1. Lemus, J.E.G., *Propiedades Físico Mecánicas de la madera plástica elaborada con polímeros reciclados como aglutinantes*. Revista Canalización del Conocimiento Científico, 2022. 1.
2. Luna, P. and J.M. Lizarazo-Marriaga, *Fibras naturales como refuerzo en materiales compuestos de matriz polimérica*. Momento, 2022(65): p. 65-79.
3. Gumus, N., E. Doganci, and A. Aytac, *Evaluations of the effects of different flame retardants combinations on particleboards produced using urea-formaldehyde resin*. European Journal of Wood and Wood Products, 2024. 82(3): p. 747-759.

**Optimización de propiedades mecánicas de un aglomerado sintético mediante metodología de superficie de respuesta**

4. Thakur, H.K. and G. Prasad, *Mode I, Mode II, and Mixed Mode I/II Fracture Behavior of Laminated Structures*, in *Fracture Behavior of Nanocomposites and Reinforced Laminate Structures*. 2024, Springer. p. 123-155.
5. Prvanov, S., *The refurbishment of M/V Anna Maru four samples of using durable wood products in passenger ship interior and exterior design*. *Journal of Wood Science*, 2017. **5**.
6. Ramezani Dana, H. and F. Ebrahimi, *Synthesis, properties, and applications of polylactic acid-based polymers*. *Polymer Engineering & Science*, 2023. **63**(1): p. 22-43.
7. Ajaj, Y., et al., *Effect and investigating of graphene nanoparticles on mechanical, physical properties of polylactic acid polymer*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2024. **9**: p. 100612.
8. Batista-Menezes, D., et al., *Nanocelulosas a partir de biomasas con amplio potencial industrial en Costa Rica*. *NANOCELIA*: p. 111.
9. Satyanarayana, K., J. Guimarães, and F. Wypych, *Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(7): p. 1694-1709.
10. Inegbedion, F., F. Inegbedion, and I.E. Osasona, *Coconut Fibre (Coir) Composites: A Review*. *Journal of Materials Engineering, Structures and Computation*, 2024. **3**(2).
11. Rencoret, J., et al., *Structural characterization of lignin isolated from coconut (Cocos nucifera) coir fibers*. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2013. **61**(10): p. 2434-2445.
12. Boublia, A., et al., *State-of-the-art review on recent advances in polymer engineering: modeling and optimization through response surface methodology approach*. *Polymer Bulletin*, 2023. **80**(6): p. 5999-6031.