

ISSN: 3073-0996 (versión digital)

# Memorias

del Congreso Internacional  
de Innovación Tecnológica

Editores

Luisa Martínez Acosta  
Rafael Gómez Vásquez

Compiladores

Luisa Martínez Acosta  
Rafael Gómez Vásquez



## Autores

Giovanni Morales Medina  
Silvia Valentina Rodríguez Delgado  
Juan Diego Nocua Paba  
Rafael Gómez Vásquez  
Blanca Foliaco  
Antonio Bula Silvera  
Javier Sánchez Castillo  
Katerin Osorio Barrera  
Daniel Espinosa Corrales  
Sandra Margarita Villa Marengo  
María Bernarda Alvarado Bawab  
Valentina Ramírez Hernández  
Gabriela Cristina Morales Barón  
Vanessa Estela Hoyos Díaz  
Alejandra Pérez Zapata  
Santiago de Jesús Sotomayor Brún  
Edgar de Jesús Galvis López  
Elian David Martínez Penagos  
Gloria Esther Urrea Ceferino  
Natalia Lucía Cuello Díaz  
Rafael Eduardo Bustos Fuentes  
Andrea Niampira Daza  
Ricardo Alberto Díaz Sofán

Elías José Quintana Ricardo  
Ana María Martínez  
Sebastián Argumedo  
Luisa María Pérez Cogollo  
Maria Claudia Reyes Portillo  
María Alejandra Muñoz Nieves  
Daniel Fernando Russo Ortíz  
Santiago Pérez Rodríguez  
Julián Daniel Zabaleta Piñarte  
Silvia Alejandra Sotelo López  
Anuar Isaac Rojas Muñoz  
José Luis Salgado Cordero  
Rafael Eduardo Tuirán Villalba  
Claudia Marcela Pérez Madrid  
Ana Gabriela Tirado Baltazar  
Rubén Darío Bonilla García  
Wendy Yolaine Díaz Piña  
Norma Cristina Solarte Vanegas  
Juliana Madrid Palomino  
Mariana Lengua Tobías  
María Camila Regino Méndez  
Linda Isabel Vergara Naranjo



# Memorias resultado de:

II Congreso Internacional de Innovación  
Tecnológica y Procesos Circulares y  
del II Encuentro de Internacional de Semilleros  
en Innovación Tecnológica y Procesos Circulares

Editores

Luisa Martínez Acosta

Rafael Gómez Vásquez

Compiladores

Luisa Martínez Acosta

Rafael Gómez Vásquez

© Varios autores  
© Editorial Universidad Pontificia Bolivariana  
Vigilada Mineducación

**Memorias del Congreso Internacional de Innovación Tecnológica**

ISSN: 3073-0996 (versión digital)

Primera edición, 2025

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Seccional Montería

**Arzobispo de Medellín y Gran Canciller UPB:** Mons. Ricardo Tobón Restrepo

**Rector General:** Pbro. Julio Jairo Ceballos Sepúlveda

**Rector, Seccional Montería:** Pbro. Juan Camilo Restrepo Tamayo

**Vicerrector Académico, Sede Medellín:** Álvaro Gómez Fernández

**Vicerrector Académico, Seccional Montería:** Roger Góez Gutiérrez

**Decana de Escuela de Ingenierías y Arquitectura, Seccional Montería:** Tulia Inés Gómez Márquez

**Coordinación Editorial UPB:** Lisa María Colorado Rodríguez

**Producción:** Ana Milena Gómez Correa

**Diagramación:** Ana Mercedes Ruiz Mejía

**Corrección de Estilo:** Weimar Toro

**Imagen de portada:** Oficina de Comunicaciones UPB Montería

**Dirección Editorial:**

Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2025

Correo electrónico: editorial@upb.edu.co

www.upb.edu.co

Telefax: (57)(4) 354 4565

A.A. 56006 - Medellín - Colombia

**Radicado:** 2333-02-12-24

Los trabajos completos publicados en este libro han sido reproducidos fielmente a partir de los textos enviados por los autores, sin alteraciones ni modificaciones. Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de este libro por cualquier medio físico o digital sin el permiso expreso y por escrito de los editores. Esto incluye fotocopia, digitalización, distribución en línea y cualquier otro tipo de copia o redistribución del contenido. Los editores se reservan todos los derechos relacionados con la publicación y distribución de este libro, y cualquier solicitud de reproducción debe ser dirigida a ellos para su evaluación y autorización.

<https://www.upb.edu.co/es/congreso-internacional-innovacion-tecnologica-monteria#textolibre-1464263488752> .

### **Comité Científico Internacional**

Diego Alejandro Camargo Trillos  
Valentina Ramírez Hernández  
Luisa Martínez Acosta  
Linda Alejandra Rodulfo Gómez  
Juan Pablo Medrano Barboza  
Rafael David Gómez Vásquez  
York Lays Andrea Niampira Daza  
Carmen Elena Pérez Cervera  
Guillermo Acuña Robles  
Luisa María Ochoa Reyes  
Luis Salvador Correa Flórez  
Rafael Eduardo Tuirán Villalba  
Claudia Serpa Imbett Ingeniería  
Daniel Eduardo Espinosa Corrales  
Fabián Alonso Lara Vargas  
Javier Ricardo Sánchez Castillo  
Bertha Cecilia Rincón Silva  
Lorelys Vega Meléndez  
Ernesto Martínez Sandoval  
Jesús Águila León  
Juan Carlos Marín Villegas  
Víctor Manuel Fontalvo Morales  
Diego M. Yepes Maya  
Alfredo Daniel Moreno Arteaga  
Carolina Ospina Aguirre

Ingeniería Mecánica – UPB Montería  
Ingeniería Industrial – UPB Montería  
Ingeniería Civil – UPB Montería  
Arquitectura – UPB Montería  
Ingeniería Civil – UPB Montería  
Ingeniería Mecánica – UPB Montería  
Arquitectura – UPB Montería  
Ingeniería Agroindustrial – UPB Montería  
Ingeniería Sanitaria y Ambiental – UPB Montería  
Semilleros – CIDI – UPB Montería  
Ingeniería Sanitaria y Ambiental – UPB Montería  
Ingeniería Mecánica – UPB Montería  
Electrónica – UPB Montería  
Ingeniería Mecánica – UPB Montería  
Ingeniería Electrónica – UPB Montería  
Ingeniería Mecánica – UPB Montería  
Ingeniería Civil – UPB Montería  
Centro de Ciencias Básicas – UPB Montería  
Universidad Estatal de Sonora – México  
Universidad de Guadalajara – México  
Universidad del Bío – Chile  
Universidad de Magallanes – Chile  
Universidade Federal de Itajubá – Brasil  
HEC Université de Montréal – Canadá  
Universidad Autónoma de Manizales – Manizales

# Tabla de contenido

<b>Prólogo</b> .....	8
<b>Sección I. Trabajos presentados en el II Congreso Internacional de Innovación Tecnológica y Procesos Circulares</b> .....	10
<b>Innovación en materiales y recubrimientos</b> .....	11
Simulación molecular de la adsorción de hidrocarburos aromáticos en carbón activado.....	11
<i>Giovanni Morales Medina, Silvia Valentina Rodríguez Delgado, Juan Diego Nocua Paba</i>	
Análisis de la fragilización por hidrógeno en el uso de aceros de bajo carbono, para el diseño de reactores de gasificación de biomasa operados a presión atmosférica .....	23
<i>Rafael Gómez, Blanca Foliaco, Antonio Bula, Javier Sánchez, Katerin Osorio, Daniel Espinosa</i>	
<b>Economía circular y sostenibilidad, gestión - Optimización de procesos y confort térmico y eficiencia energética</b> .....	41
Estado actual de circularidad en una empresa mediana del departamento del Atlántico: caso de estudio.....	41
<i>Sandra Margarita Villa Marengo, María Bernarda Alvarado Bawab</i>	
Gestión de la jerarquía del <i>Lean Manufacturing</i> en función de la trazabilidad de las funciones: un caso en pymes de la región Caribe de Colombia.....	59
<i>Valentina Ramírez Hernández, Gabriela Cristina Morales Barón, Vanessa Estela Hoyos Díaz, Alejandra Pérez Zapata, Santiago de Jesús Sotomayor Brun, Edgar de Jesús Galvis López, Elian David Martínez Penagos</i>	
Análisis de confort térmico en laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana.....	75
<i>Gloria Esther Urrea Ceferino, Natalia Lucia Cuello Diaz, Rafael Eduardo Bustos Fuentes, Andrea Niampira Daza</i>	

<b>Sección II. Trabajos presentados en el II Encuentro Internacional de Semilleros en Innovación Tecnológica y Procesos Circulares</b> .....	92
Fibra vegetal del vástago de plátano: una alternativa para el aumento de resistencia del mortero .....	93
<i>Ricardo Alberto Díaz Sofan, Elías José Quintana Ricardo, Ana Maria Martinez, Sebastian Argumedo, Gloria Urrea Ceferino</i>	
Propiedades termoacústicas en diferentes ecomateriales .....	103
<i>Luisa María Pérez Cogollo, María Claudia Reyes Portillo, Andrea Niampira Daza</i>	
Clasificador automático para la detección de carga empleando señales cinéticas de marcha .....	114
<i>María Alejandra Muñoz Nieves, Daniel Fernando Russo Ortiz, Santiago Pérez Rodríguez, Julián Daniel Zabaleta Piñarte, Silvia Alejandra Sotelo López</i>	
Optimización topológica de un chasis SSV para el Dakar .....	123
<i>Anuar Isaac Rojas Muñoz, José Luis Salgado Cordero, Rafael Eduardo Tuiran Villalba, Claudia Marcela Pérez Madrid</i>	
Confort térmico, cualidades tectónicas y bioclimáticas de las viviendas de bahareque en la Sabana cordobesa .....	137
<i>Ana Gabriela Tirado Baltaza, Gloria Esther Urrea Ceferino</i>	
Mezcla asfáltica en caliente, mezcla sostenible: reporte de caso de la cerámica residual .....	151
<i>Rubén Darío Bonilla García, Wendy Yolaine Díaz Piña, Norma Cristina Solarte Vanegas</i>	
Diagnóstico del sistema logístico de la ladrillera "Los Cerros la 34" .....	163
<i>Juliana Madrid Palomino, Mariana Lengua Tobías, María Camila Regino Méndez, Linda Isabel Vergara Naranjo, Valentina Ramírez Hernández</i>	

# Prólogo

Es un honor presentar las memorias del *II Congreso Internacional de Innovación Tecnológica y Procesos Circulares* y del *II Encuentro de Internacional de Semilleros en Innovación Tecnológica y Procesos Circulares*, organizado por la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, los cuales se llevaron a cabo del 4 al 6 de octubre de 2023. Este evento reunió a académicos, investigadores, profesionales y estudiantes de diversas disciplinas, con el objeto de explorar y avanzar en el campo de la innovación tecnológica desde un enfoque en los procesos circulares. Las temáticas abordadas este año en el evento se eligieron para reflejar la urgencia de abordar los desafíos ambientales y económicos que enfrenta nuestra sociedad contemporánea. Mediante la colaboración interdisciplinaria y el intercambio de ideas, buscamos transformar la manera en que producimos, consumimos y gestionamos los recursos, promoviendo prácticas sostenibles que puedan ser adoptadas a nivel global.

Este congreso ha proporcionado un espacio para la presentación de investigaciones, la discusión de nuevas ideas y la creación de redes entre profesionales. Las ponencias, las muestras empresariales y los trabajos de semilleros incluyeron temas de vanguardia, como la fabricación sostenible, la gestión energética, los materiales innovadores y el urbanismo bioclimático. Además, el encuentro contó con la participación de destacados expertos internacionales que compartieron sus conocimientos y experiencias, enriqueciendo el diálogo y fomentando una comprensión profunda de cómo la tecnología puede ser un motor clave para el desarrollo sostenible.

Agradecemos a todos los participantes, ponentes y organizadores por su dedicación y esfuerzo. Esperamos que estas memorias sirvan como registro del conocimiento compartido y como fuente de inspiración para futuras investigaciones y proyectos en innovación tecnológica y procesos circulares.

**Tulia Inés Gómez Márquez**

Decana, UPB Montería

**Rafael David Gómez Vásquez**

Docente, Ingeniería Mecánica, UPB Montería

**Luisa Martínez Acosta**

Docente, Ingeniería Civil, UPB Montería



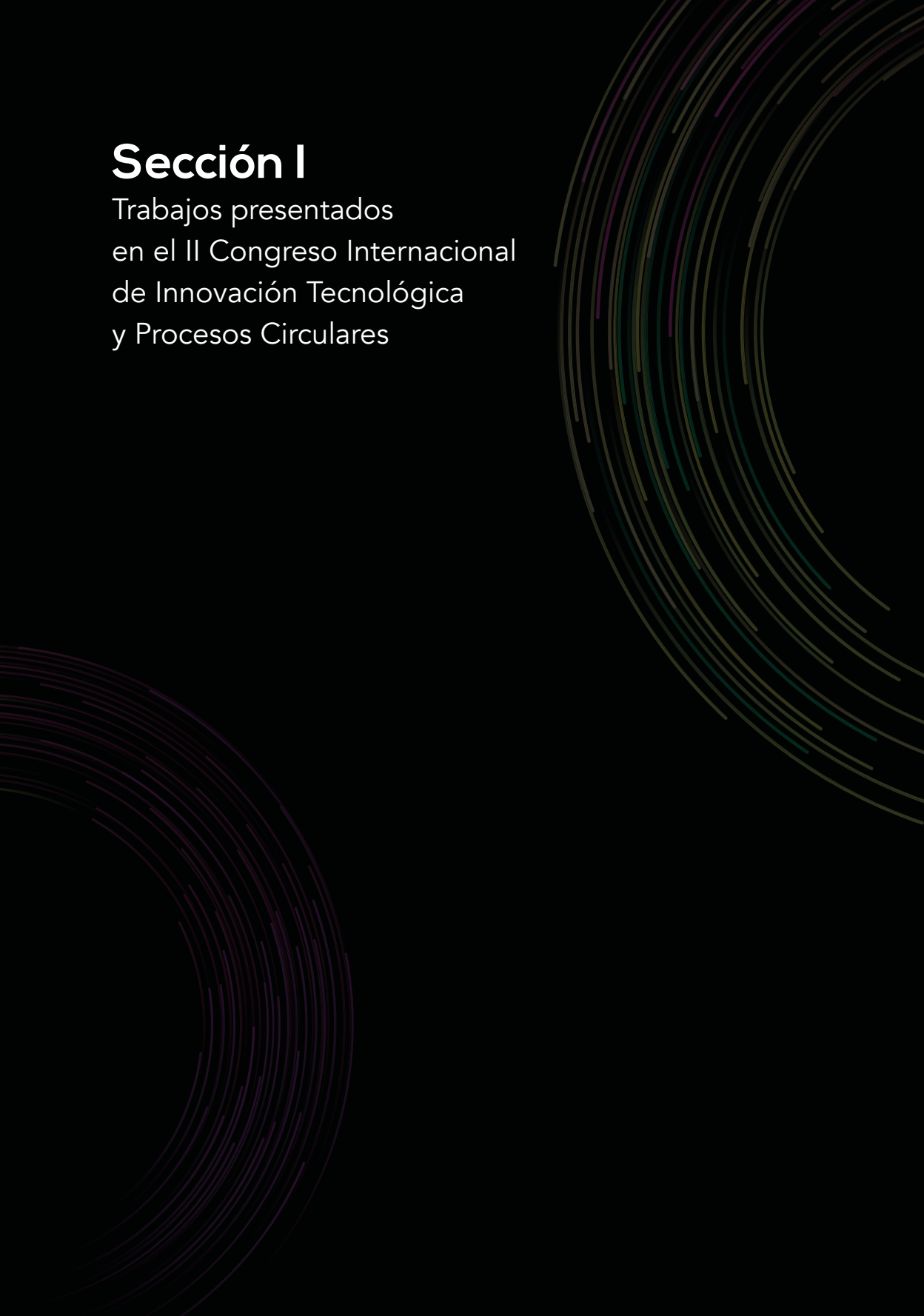
## Universidad Pontificia Bolivariana

La Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), fundada en 1936, se dedica a la formación integral de personas en un ambiente académico que promueve el desarrollo humano, científico, cultural y espiritual. Su misión es formar profesionales con un alto sentido ético y social, comprometidos con el desarrollo integral de la sociedad, por medio de la generación y transmisión de conocimiento en diversas áreas del saber. La visión de la UPB es ser una universidad reconocida por su excelencia académica, su contribución al desarrollo sostenible y su impacto positivo en la comunidad local e internacional.

El *II Congreso Internacional de Innovación Tecnológica y Procesos Circulares*, organizado por la UPB, refleja su compromiso con estos principios. El evento apoya la visión de la UPB de ser un referente en investigación, innovación y formación de líderes responsables y éticos, y proporciona una plataforma para la presentación de investigaciones, la discusión de nuevas ideas y la creación de redes profesionales. Así, el congreso no solo sirve como un espacio de aprendizaje y desarrollo profesional, sino también como una manifestación tangible del compromiso de la UPB con la excelencia académica y el impacto positivo en la sociedad.

# Sección I

Trabajos presentados  
en el II Congreso Internacional  
de Innovación Tecnológica  
y Procesos Circulares



# Simulación molecular de la adsorción de hidrocarburos aromáticos en carbón activado

Giovanni Morales Medina<sup>\*\*\*</sup>  
Silvia Valentina Rodríguez Delgado<sup>\*</sup>  
Juan Diego Nocua Paba<sup>\*</sup>

---

\* Universidad Industrial de Santander, Ingeniería Química. gmorales@correo.uis.edu.co; silvia2172841@correo.uis.edu.co; juan2172822@correo.uis.edu.co

\*\* Autor para correspondencia.

## Resumen

Los hidrocarburos aromáticos (HA) son compuestos orgánicos generados naturalmente en los procesos de combustión o refinado, y son constituyentes naturales de los combustibles. Debido a su volatilidad y estructura formada principalmente de carbono e hidrógeno, que se evaporan de manera rápida y fácil en el aire, produce efectos indeseables en el ambiente y la salud humana. Para reducir su impacto, los HA pueden ser retirados a partir de un adsorbente como el carbón activado, cuya efectividad depende de la interacción entre los compuestos. En este trabajo se analizan las interacciones y el grado de adsorción de los HA, específicamente, benceno, en carbón activado, utilizando dinámica molecular y empleando el campo de fuerza COMPASS. Para esto, la celda de carbón activado fue construida con láminas de grafeno y una posterior estabilización de la estructura. Después, la celda fue utilizada en la captura de benceno a diferentes presiones. El programa de uso libre LAMMPS fue utilizado en la ejecución de las simulaciones. Según los resultados, las interacciones entre los oxígenos de las láminas de grafeno y los hidrógenos de los bencenos contribuyen con la captura en carbón activado. También, el grado de adsorción de benceno calculado a 60 atm fue de 0.173 g de benceno por 1 g de carbón activado, grado de adsorción que coincide con resultados experimentales reportados en la literatura.

**Palabras clave:** Simulación molecular, adsorción, COMPASS, hidrocarburos aromáticos, carbón activado.

## Abstract

Aromatic hydrocarbons (AH) are organic compounds generated naturally in combustion or refining processes, being natural constituents of fuels. Due to their volatility and structure consisting mainly of carbon and hydrogen, which evaporate quickly and easily into the air, they produce undesirable effects on the environment and human health. To reduce its impact, AH can be removed from an adsorbent such as activated carbon, where its effectiveness depends on the interaction between the compounds. In this work, the interactions and adsorption degree of AH, specifically benzene, on activated carbon were analyzed using molecular dynamics and employing the COMPASS force field. For this, the activated carbon cell was built with graphene sheets, with a subsequent stabilization of the structure. Afterward, the cell was used to capture benzene at different pressures. The free-use program LAMMPS was used to execute the simulations. According to the results, the interactions between the oxygens of the graphene sheets and the hydrogens of the benzenes contribute to the capture using activated carbon. Also, the degree of benzene adsorption calculated at 60 atm was 0.173 g of benzene per 1 g of activated carbon, an adsorption degree that agrees with experimental results reported in the literature.

**Keywords:** Molecular Simulation, Adsorption, COMPASS, Aromatic Hydrocarbons, Activated Carbon.



## I. Introducción

La producción de compuestos generados durante la combustión incompleta de materiales orgánicos como carbón, aceite, petróleo, entre otros<sup>1</sup>, conlleva a la contaminación del medio ambiente (agua, aire y suelo). Dentro de estos compuestos podemos encontrar los hidrocarburos aromáticos (HA), su presencia en suelos de uso agropecuario representa un riesgo a largo plazo para la salud humana, debido a su impacto teratogénico, cancerígeno y mutagénico<sup>3</sup>. De igual manera, los HA pueden estar presente en altas concentraciones en sectores urbanos<sup>4,5</sup>, alimentos y durante su procesamiento industrial y refinado de aceite<sup>2</sup>. Debido a su impacto en la salud, los HA son retirados mediante filtros de tela, filtros catalíticos, desulfuración seca y húmeda, entre otros procedimientos<sup>6</sup>. Según lo reportado en literatura, la eficiencia de retiro de los HA depende del peso molecular y de la fase en la que se encuentren<sup>7</sup>; por esto, la eliminación de los HA se efectúa aplicando distintos métodos de retiro<sup>8</sup>.

Uno de los métodos utilizados corresponde al retiro por medio de adsorbentes, como el carbón activado<sup>3,8</sup>. Se ha demostrado que el carbón activado es efectivo en la eliminación de varios contaminantes, como metales pesados, colorantes, productos farmacéuticos y contaminantes orgánicos<sup>9</sup>. El grado de adsorción de las moléculas del HA en carbón activado depende de sus interacciones. El análisis de estas interacciones y de la eficiencia de la adsorción se puede dar por los métodos de simulación molecular, los cuales aplican campos de fuerza, como AUA, Dreiding, COMPASS, entre otros<sup>8</sup>.

En consideración de lo anterior, Yang *et al.*<sup>17</sup> en su investigación sobre la adsorción de naftaleno, fenantreno y pireno en MCM-41, con el campo de fuerza Dreiding, aseguran que el orden de adsorción en la superficie del poro correspondió a: pireno > fenantreno > naftaleno, lo cual coincide con los resultados experimentales. Asimismo, los autores mencionaron que la actividad de los átomos de carbono disminuye con la distancia a la posición central de los poros. Por su parte, Navarro *et al.*<sup>18</sup> analizaron la adsorción de fenantreno en carbón activado aplicando el campo de fuerzas AUA y consideraron diferentes condiciones (presión hasta 100 Pa, tamaños de poro entre 6 – 20 Å), pero a temperatura constante (150 °C). Según los resultados, un tamaño de poro de 17 Å y una presión parcial de 2 Pa reportan la máxima la adsorción en carbón activado.

Por su parte, Li *et al.*<sup>19</sup> estudiaron la adsorción del benceno en carbón activado y la influencia de distintas temperaturas. Esto fue desarrollado aplicando COMPASS. Los resultados permitieron concluir que los microporos grandes y mesoporos favorecen la adsorción de moléculas de benceno en el carbón a bajas temperaturas, mientras los microporos pequeños favorecen la adsorción de moléculas de benceno a elevadas temperaturas. También, Sui *et al.*<sup>20</sup> coinciden con Li *et al.* en que la difusión y adsorción de una mezcla de HA en nanoporos pequeños están controladas por el equilibrio entre las fuerzas de atracción y la energía térmica.

De acuerdo con los trabajos anteriores, es posible mencionar que la simulación molecular ha reportado resultados comparables con los respectivos valores experimentales. Sin embargo, la mayoría de los trabajos en el área han desarrollado análisis con presiones moderadas, inferiores de 10 atm. Frente a esto, el presente trabajo propone el análisis de la adsorción de los HA en carbón activado hasta presiones de 60 atm, utilizando dinámica molecular y empleando el campo de fuerza COMPASS. Los resultados de simulación molecular pueden caracterizar las interacciones para la adsorción de HA en carbón activado a diferentes presiones.

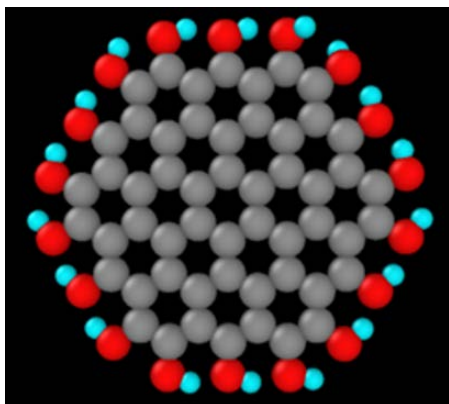
## 2. Métodos

### 2.1 Celda de carbón activado

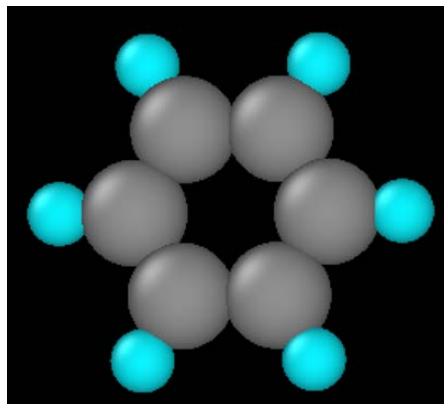
El carbón activado fue asumido como un conjunto de láminas de grafeno, en concordancia con Li *et al.*<sup>10</sup> y Oufir *et al.*<sup>11</sup>. La lámina de grafeno (Figura 1) se compone de 7 anillos y 6 átomos de C unidos a estos, para un total de 54 átomos de C, 18 átomos de O y 18 átomos de H<sup>10</sup>. La celda de carbón activado consideró 39 láminas de grafeno, tomando como base una densidad de 0,7 g/cm<sup>3</sup> y un tamaño de celda de 50x50x50 Å<sup>3</sup> mencionadas en la literatura<sup>10,12</sup>. La lámina de grafeno y la molécula de benceno fueron construidas con el programa Avogadro (Figura 2). La configuración inicial de las 39 láminas de grafeno y las moléculas de benceno fueron definidas con el programa de uso libre Packmol.



**Figura 1.** Lámina de grafeno base de la celda de carbón activado.



**Figura 2.** Molécula de Benceno.



Nota: C: gris, O: rojo, H: azul.

## 2.2 Estabilización de la celda de carbón activado

La compilación inicial de las láminas de grafeno fue tomada como base para lograr una configuración estable del carbón activado por medio de simulación con dinámica molecular (MD). La simulación MD fue aplicada según los códigos del programa de uso libre LAMMPS. Para su ejecución, LAMMPS requiere la definición de parámetros moleculares y del campo de fuerza, así como de parámetros de ejecución, todos estos especificados en los archivos de entrada ".in", ".data" y ".mod". El campo de fuerza implementado en las simulaciones fue el COMPASS. La ejecución comprende una primera etapa de minimización energética por mecánica molecular, una segunda etapa de relajación del sistema a 9000 K (en la cual las fuerzas intermoleculares son nulas y las láminas se pueden desplazar con pocas restricciones en la celda, estableciendo una configuración sin sesgo para un enfriamiento posterior) por 1 fs aplicando el colectivo microcanónico (NVE), seguida de diversas etapas de enfriamiento en equilibrio hasta una temperatura 300 K por 1 fs con el colectivo isotérmico-isobárico (NPT), y finalizando una etapa de producción y relajación a 300 K por 1 fs, con el colectivo NPT<sup>3,8,12,13</sup>.

## 2.3 Simulación de la captura de benceno en carbón activado

La adsorción de benceno se simula con base en la celda de carbón activado obtenido en la sección anterior. La cantidad de moléculas de benceno que rodea la celda de carbón activado fue establecida con la ecuación del estado de gas ideal en un volumen con dimensiones  $100 \times 100 \times 100 \text{ \AA}^3$  (teniendo en cuenta el volumen de la celda de carbón activado), una temperatura de 300 K y para 6 valores de presión (1, 5, 10, 20, 40 y 60 atm). La estructura inicial del sistema de adsorción fue creada con el programa Packmol, en el que se fijó una distancia mínima de 2  $\text{\AA}$  entre la celda de carbón activado y las moléculas de benceno.

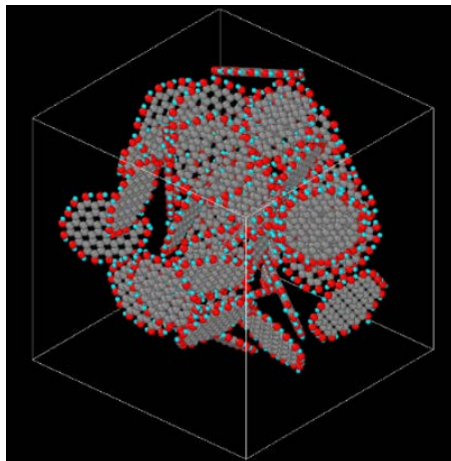
La simulación de la adsorción de benceno en LAMMPS se llevó a cabo en las siguientes etapas: la primera alcanza el equilibrio de la energía del sistema a 300 K, a través de un colectivo NVE por 0,1 ns; la segunda permite equilibrar la temperatura del sistema a 300 K y 0,1 ns con el colectivo canónico (NVT); y por último, el uso del colectivo NPT a 300 K y 1 ns variando la presión para la adsorción de benceno. LAMMPS reporta los resultados geométricos de la simulación en el archivo ".data" y ".trj". El análisis y la visualización de los resultados se realizaron con base en el programa OVITO. De acuerdo con lo reportado en la literatura, una distancia de 5  $\text{\AA}$  con respecto al adsorbente (carbón activado) fue tomada para considerar la adsorción de una molécula de benceno<sup>14</sup>.

## 3. Resultados y discusiones

Las 39 láminas de grafeno (2106 átomos de C y 702 átomos de O e H) fueron distribuidas en un espacio de  $50 \times 50 \times 50 \text{ \AA}^3$ , lo cual consolidó la estructura de carbón activado obtenida a través del programa Packmol (Figura 3). Con la configuración inicial, la simulación fue realizada como fue mencionado en la metodología. Una vez ejecutada la simulación se obtiene la configuración final del carbón activado (Figura 4).

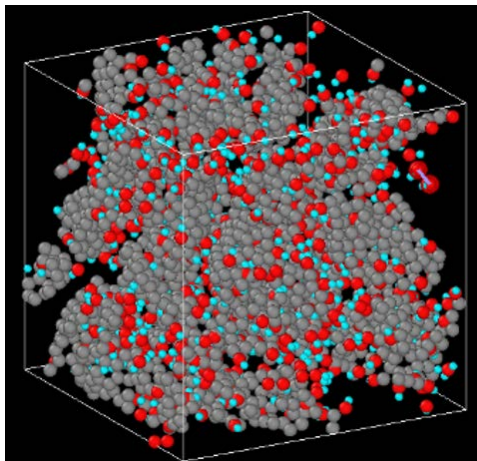


**Figura 3.** Configuración inicial celda de carbón activado.



Nota: C: gris, H: azul, O: rojo.

**Figura 4.** Configuración final celda de carbón activado.

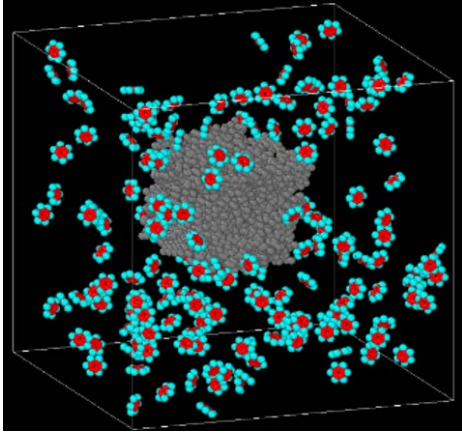


Nota: C: gris, H: azul, O: rojo.

Con la finalidad de conocer si el tamaño de poro promedio entre los átomos se encuentra dentro del tamaño previsto para el carbón activado, se tuvieron en cuenta las diferentes distancias entre los átomos de C, H y O, según lo reportado por OVITO. El tamaño de poro promedio o distancia promedio entre las láminas determinado fue de 2.905 Å, valor que concuerda con los resultados reportados en literatura<sup>11,21</sup>. Este bajo valor para el tamaño de poro se debe a la composición tomada para la lámina de grafeno (Figura 1), la cual presenta una estructura con enlaces tipo puente de hidrógeno.

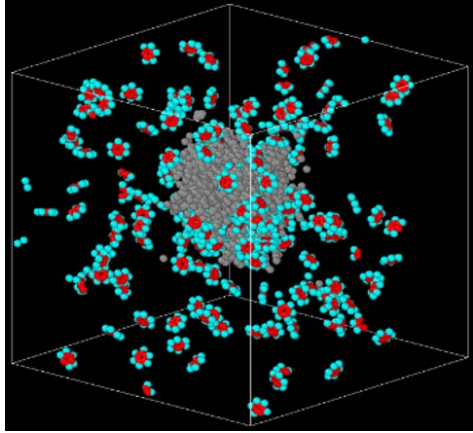
La estructura de carbón activado fue utilizada en la simulación de la captura de benceno. En las figuras 5 y 6 se presentan, respectivamente, las configuraciones inicial y final (después de la simulación) del sistema para la captura de benceno a una presión de 60 atm.

**Figura 5.** Configuración inicial sistema de adsorción a 60 atm.



Nota: Celda de carbón activado: gris,  
C: rojo, H: azul.

**Figura 6.** Configuración final sistema de adsorción a 60 atm.



Nota: Celda de carbón activado: gris,  
C: rojo, H: azul.

Un análisis de la configuración en los resultados de simulación (Figura 6) demuestra que, las moléculas de benceno son atraídas al carbón activado, debido a la interacción entre los hidrógenos aromáticos y los oxígenos de las láminas de grafeno. De igual manera, las moléculas de benceno ya adsorbidas atraen otras moléculas de benceno en orientación paralela, a una distancia promedio de 3.81 Å. La orientación paralela en compilados de moléculas de benceno corresponde a una disposición energéticamente favorable. La molécula de benceno tiene un fuerte momento cuadrupolar, que resulta de la distribución no uniforme de la carga en un sistema de enlace  $\pi$ , representado por un entramado de enlaces  $\sigma$  con carga positiva y dos nubes de electrones  $\pi$  con carga negativa. Con esto, la orientación paralela permite una mayor interacción entre las nubes electrónicas de los bencenos. Por otra parte, las orientaciones verticales e inclinadas se presentan, principalmente, en los átomos cercanos a la superficie y maximizan la entropía del sistema. Se debe tener en cuenta que la orientación de las moléculas se ve influenciada por la presencia de moléculas en capas más altas debido a su interacción<sup>15</sup>. Las orientaciones perpendiculares o paralelas son el resultado de las interacciones electrostáticas  $\pi$ - $\pi$  y  $\pi$ - $\sigma$  y las interacciones de Van Der Waals. Para el caso de simulaciones moleculares, una configuración perpendicular para compilados de benceno, en capas elevadas, infiere la carencia de la función de momento cuádruple en el campo de fuerza utilizado<sup>16</sup>.



Por otra parte, en la Tabla 1 se presentan los resultados de simulación sobre las moléculas de benceno adsorbidas en cada presión. Asimismo, la tabla presenta la masa de benceno adsorbido por masa de carbón activado.

**Tabla 1.** Resultados de simulación para la cantidad de benceno adsorbido en carbón activado

<b>P, atm</b>	<b>Bi</b>	<b>Ba</b>	<b>Bv</b>	<b>C, g/g</b>
1	4	4	0	0.008
5	16	15	1	0.031
10	31	31	0	0.065
20	62	49	13	0.103
40	123	73	50	0.153
60	184	82	102	0.172

Fuente: elaboración propia.

Nota: Bi: moléculas de benceno iniciales sin adsorber antes de la simulación; Ba: moléculas de benceno adsorbidas después de la simulación; Bv: moléculas de benceno no adsorbidas después de la simulación; C: masa benceno adsorbida por masa carbón activado.

Según estos resultados, la adsorción de benceno en carbón activado se ve incrementada por el aumento en la presión; es decir, el grado de adsorción de benceno aumenta con la presión de operación. Según la simulación, a una presión de 60 atm, el grado de adsorción reporta que 0.172 g de benceno son capturados por 1 g de carbón activado. Este valor coincide con el trabajo de Lai *et al.*<sup>22</sup>, quienes reportan que a 60 atm el grado de adsorción de benceno en carbón activado es de 0.163.

## 4. Conclusiones

El modelo que describe la celda de carbón activado presenta estabilidad tras su simulación con un tamaño de poro de 2.905 Å, lo cual se ajusta a lo reportado por otros autores. Por otra parte, los resultados de la adsorción por dinámica molecular muestran que la adsorción se ve favorecida por interacciones entre los oxígenos del carbón activado y los hidrógenos del benceno. Asimismo, los bencenos presentan

atracciones en orientaciones verticales entre ellos que contribuyen con la captura en carbón activado. También, según los resultados de dinámica molecular, el grado de adsorción obtenido es de 0.172 g de benceno por 1 g de carbón activado. Este valor coincide con lo reportado en otros resultados experimentales. Con lo anterior, la adsorción de benceno en carbón activado presenta una favorabilidad debido a las interacciones moleculares soportando el desarrollo de tecnologías tendiendo principalmente a la recuperación de solventes, separación de gases, remoción de tintes en aguas residuales, entre otros.

## Referencias

1. Abdel-Shafy HI, Mansour MSM. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2016;25(1):107–23. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.03.011>.
2. Pérez-Morales López G, Morales Gómez P, Haza Duaso AI. Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) (I): Toxicidad, exposición de la población y alimentos implicados. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*. 2016;10(1). [https://doi.org/10.5209/rev\\_rccv.2016.v10.n1.51869](https://doi.org/10.5209/rev_rccv.2016.v10.n1.51869).
3. Sui H, Li L, Zhu X, Chen D, Wu G. Modeling the adsorption of PAH mixture in silica nanopores by molecular dynamic simulation combined with machine learning. *Chemosphere*. 2016;144:1950–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.10.053>.
4. Pachecho S, Escobar A. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos en ecosistemas agrícolas y su impacto a la seguridad alimentaria. 2020.
5. Seo SH, Jung KS, Park MK, Kwon HO, Choi SD. Indoor air pollution of polycyclic aromatic hydrocarbons emitted by computers. *Build Environ*. 2022;218:109107. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109107>.
6. Dat ND, Chang MB. Review on characteristics of PAHs in atmosphere, anthropogenic sources and control technologies. *Science of the Total Environment*. 2017;609:682–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.204>.
7. Sica LD, et al. Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos. 2019.
8. Navarro M, López J, Murillo R. Molecular simulation tools to determine the optimal pore size of activated carbon for PAHs adsorption. 2019.
9. Wong S, Ngadi N, Inuwa IM, Hassan O. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;175:361–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.059>.



10. Li S, Song K, Zhao D, Rugarabamu JR, Diao R, Gu Y. Molecular simulation of benzene adsorption on different activated carbon under different temperatures. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020;302:110220. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110220>.
11. El Oufir Z, Ramézani H, Mathieu N, Delpoux S. Impact of adsorbent carbons and carbon surface conductivity on adsorption capacity of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub> and gas separation. *Comput Mater Sci*. 2021;199:110572. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2021.110572>.
12. Gu ZK, Zhu CY, Huang ZQ, Xu MH, Gong L. Numerical simulations on the adsorption characteristics of aromatics on activated carbon by the GCMC method. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2021;26:101116. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101116>.
13. Thomson KT, Gubbins KE. Modeling structural morphology of microporous carbons by reverse Monte Carlo. *Langmuir*. 2000;16(13):5761–73. <https://doi.org/10.1021/la991581c>.
14. Huang Y, et al. Competitive adsorption of benzene and water vapor on lignite-based activated carbon: Experiment and molecular simulation study. *Chemical Engineering Journal*. 2020;398:125557. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125557>.
15. Klomkhang N, Do DD, Nicholson D, Tangsathitkulchai C, Wongkoblap A. Multilayer adsorption of benzene on graphitised thermal carbon black-The importance of quadrupole and explicit hydrogen in the potential model. *Chem Eng Sci*. 2012;69(1):472–82. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.11.001>.
16. Ivanova EV, Emelianova A, Khalizov AF, Gor GY, York H. Molecular simulation of benzene adsorption in graphitic and amorphous carbon slit pores. 2022.
17. Yang X, Zhang C, Jiang L, Li Z, Liu Y, Wang H, Xing Y, Yang R. Molecular Simulation of Naphthalene, Phenanthrene, and Pyrene Adsorption on MCM-41. *International Journal of Molecular Sciences*. 2019;20(3):665. <https://doi.org/10.3390/ijms20030665>.
18. Li S, Song K, Zhao D, Rugarabamu JR, Diao R, Gu Y. Molecular simulation of benzene adsorption on different activated carbon under different temperatures. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2020;302:110220. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110220>.
19. Navarro MV, López JM, García T, Murillo R. Molecular simulation tools to determine the optimal pore size of activated carbon for PAHs adsorption. 2019. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/197230>.
20. Wong S, Ngadi N, Inuwa IM, Hassan O. Recent advances in applications of activated carbon from biowaste for wastewater treatment: A short review. *Journal of Cleaner Production*. 2018;175:361–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.059>.

21. Huang Q, et al. An exceptionally flexible hydrogen-bonded organic framework with large-scale void regulation and adaptive guest accommodation abilities. *Nat Commun.* 2019;10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-10575-5>.
22. Lai MH, Shih YL, Chen YH, Shu SH, Chung TW. Equilibrium isotherms of the adsorption of pyrolysis gases from polymer products. *Journal of Chemical and Engineering Data.* 2010:723–7. <https://doi.org/10.1021/je9004273>.



# Análisis de la fragilización por hidrógeno en el uso de aceros de bajo carbono, para el diseño de reactores de gasificación de biomasa operados a presión atmosférica

Rafael Gómez\*  
Blanca Foliaco\*\*  
Antonio Bula\*\*  
Javier Sánchez\*\*\*  
Katerin Osorio\*  
Daniel Espinosa\*

- 
- \* Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de investigación Optimización y Uso Racional de la Energía y Biomasa, Ingeniería Mecánica.
  - \*\* Fundación Universidad del Norte, Grupo de Investigación de Uso Racional de la Energía y Preservación del Medio Ambiente, Ingeniería Mecánica.
  - \*\*\* Autor para correspondencia: [javier.sanchezc@upb.edu.co](mailto:javier.sanchezc@upb.edu.co)

## Resumen

El presente trabajo muestra una evaluación teórica de la operación de aceros de bajo carbono (Acero SAE 1020) como material para el diseño de gasificadores que modelan relaciones de permeación difusiva a altas temperaturas, empleando la ley de Fick de segundo orden y teniendo en cuenta los efectos del daño por hidrógeno en las propiedades de varios materiales. También se evaluarán diversos criterios de falla asociados a los esfuerzos térmicos y se harán inferencias en el efecto del hidrógeno sobre las propiedades del material mediante análisis teórico. Esto con el fin de predecir la vida útil y la factibilidad económica en el uso de aceros de bajo carbono para aplicaciones de baja escala en reactores expuestos al daño por hidrógeno y alta temperatura. En los perfiles de permeación de hidrógeno evaluados, después de 100 horas de operación de la planta, la permeación alcanza la totalidad del espesor de la placa (4 mm). Debido a que ambos lados de la placa están en contacto con el gas, la permeación se da en ambas direcciones, por lo que 2 mm es un valor medio aproximado de penetración con una concentración de 2.7 ppm, lo cual lleva a más del 95% del material a concentraciones de hidrógeno superiores a 6 ppm. Según los datos obtenidos en la literatura y en estudios realizados por diversos autores muestran un comportamiento similar para varios tipos de acero en presencia de hidrógeno. En el caso del acero AISI/SAE 1020 el esfuerzo último registra una reducción del 28%, la tenacidad registra una reducción del 44%. En el análisis por fatiga, por el método de bajo ciclaje, no se observa una diferencia notable en el ciclo de vida útil. Por lo tanto, los componentes del reactor con acero AISI/SAE 1020 no deberían fallar por fatiga.

**Palabras clave:** gasificación, fragilización, difusión, ley de Fick, hidrógeno.

## Abstract

The present work shows a theoretical evaluation of the operation of low carbon steels (Steel SAE 1020) as a material for the design of gasifiers, modeling diffusive permeation relationships at high temperatures using Fick's law of second order and taking into account the effects of hydrogen damage on the properties of various materials, various failure criteria associated with thermal stresses will be evaluated, inferences will also be made on the effect of hydrogen on the properties of the material through analyzes based on bibliographic data. This in order to predict the useful life and the economic feasibility in the use of low carbon steels for low-scale applications in reactors exposed to damage by hydrogen and high temperature. The hydrogen permeation profiles evaluated, after 100 hours of operation of the plant, the permeation reaches the entire thickness of the plate (4 mm). Because both sides of the plate are in contact with the gas, permeation occurs in both directions with 2 mm being an approximate mean value of penetration at a concentration of 2.7 ppm, and leading to more than 95% of the material at concentrations of hydrogen greater than 6 ppm. According to the data obtained in the literature and in studies carried out by various authors, they show a similar behavior for various types of steel in the presence of hydrogen. In the case of AISI/SAE 1020 steel, the ultimate stress registers a reduction of 28%, the toughness registers a reduction of 44%. When analyzing by fatigue, by the low cycling method, a notable difference in the useful life cycle is not observed. Therefore, reactor components with AISI/SAE 1020 steel should not fail due to fatigue.

**Keywords:** Gasification, Embrittlement, Diffusion, Fick's Law, Hydrogen.



## I. Introducción

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico de transformación en tres subproductos de diversas materias primas a base de carbono: una ceniza enriquecida en carbono, llamada en este artículo "biochar"; bioaceites y gas de síntesis, como syngas, obtenido por oxidación parcial del carbono y que puede ser empleado para la generación de energía eléctrica, energía térmica o para la síntesis de otros compuestos químicos, ya que, bajo las condiciones de operación de la gasificación, el syngas está compuesto por una mezcla de gases con una importante contribución del hidrógeno  $H_2$ , el monóxido de carbono  $CO$  y metano  $CH_4$ , por lo cual la gasificación de biomasa puede ser empleada en ciclos IGCC para la producción de energía eléctrica, a partir de motores de combustión interna diseñados para la utilización del syngas producto de la gasificación. Esta tecnología constituye un mecanismo para la generación de energía a partir de fuentes renovables y es clasificada dentro de las fuentes no convencionales de energía<sup>1</sup>.

Los aceros comerciales recomendados para uso en los gasificadores de carbón que se encuentran dentro del marco regido la norma ASME son de 2 tipos: aceros de aleaciones MnMoNi y CrMo. Los aceros MnMoNi han sido usado exitosamente en contenedores de presión nuclear, en los que son requeridas unas propiedades mecánicas en la sección más gruesa del elemento. En este trabajo se busca evaluar la viabilidad teórica de dichos aceros al carbono en gasificadores, además, se realiza una investigación sobre los modelos de difusión de hidrógeno en aceros al carbono llamados, comercial y académicamente, "aceros de bajo carbono", los cuales contienen una baja aleación (menos de 0.3% C) que no puede contrarrestar los efectos de la fragilización por hidrógeno mediante el uso de elementos aleantes especiales, como el Mo y el Ni.

Característicamente los aceros desarrollan una microestructura bainítica uniforme a través de la sección gruesa. Sin embargo, las exigencias y normativas ambientales, para el área nuclear, son mucho menos severas que las que son encontradas en un gasificador y estas deben ser consideradas si se utiliza este tipo de acero. El segundo acero para ser considerado es el de tipo CrMo, el cual se usa en medios de alta presión y ambientes hidrogenados de altas temperaturas. Aún así, en la sección más gruesa del elemento, estos aceros desarrollan cantidades significativas de ferrita y una degradación asociada sobre las propiedades mecánicas, por lo que ninguno de los aceros propuestos cumple a cabalidad con las especificaciones requeridas para gasificadores<sup>2</sup>.

La fragilización por hidrógeno (FH) es un mecanismo de daño difusivo y acumulativo que afecta los materiales, deteriorándolos a través de procesos de corrosión. Este fenómeno ocurre cuando el hidrógeno se difunde y satura los poros del material dentro de su estructura cristalina, especialmente en ambientes ricos en hidrógeno. Durante este proceso, el hidrógeno del entorno penetra inicialmente en la superficie del material y, posteriormente, se incorpora a la red cristalina del componente metálico. La acumulación progresiva de hidrógeno genera concentradores de esfuerzos, los cuales actúan como puntos de inicio para la formación de grietas, debilitando significativamente la integridad del material. Durante este proceso las propiedades mecánicas del componente metálico son seriamente afectadas, lo cual reduce su ductilidad y la capacidad de soportar las cargas, y esto promueve la formación de fisuras que se convertirán en fallas frágiles que pueden ser catastróficas, ya que ocurren a esfuerzos por debajo de  $\sigma_y^3$ .

El hidrógeno y los ambientes en los que este predomina tienen un efecto negativo sobre las propiedades mecánicas de los aceros, especialmente en su ductilidad. Desarrollos experimentales alrededor del efecto de la permeación de hidrógeno sobre las propiedades mecánicas han sido de gran interés y estudio. Los resultados más relevantes de la literatura han sido obtenidos con el fin de dimensionar el mecanismo de difusión del hidrógeno en el acero. Se ha encontrado que los efectos difusivos gobiernan la forma de permeación del hidrógeno dentro del metal, y señala efectos directos e indirectos generados por la inclusión del hidrógeno; asimismo, se estudian sus efectos secundarios, como la descarburación, formación de vacíos, nucleación y generación de fisuras.

Los efectos de la temperatura sobre la permeación del hidrógeno de una tubería de acero tipo L360NCS, a una presión de 1MPa fueron estudiados<sup>4</sup>. Los autores realizaron pruebas a diferentes temperaturas: 25 °C, 35 °C, 50 °C y 80 °C con una presión constante de 1MPa, en una solución de NaCl al 5% de concentración sin ácido acético, para evitar la introducción de iones adicionales de hidrógeno. Concluyeron que entre más alta sea la resistencia a la tensión, mayor será el grado de fragilización observado. Además, todas las curvas de permeación del hidrógeno presentaron 3 etapas: el aumento, la declinación y la etapa estable. Los valores de la difusividad de hidrógeno incrementaron de un valor promedio de  $2,92 \times 10^{-6} \frac{cm^2}{s}$ ,  $3,33 \times 10^{-6} \frac{cm^2}{s}$ ,  $4,57 \times 10^{-6} \frac{cm^2}{s}$ , hasta un valor de cuando las temperaturas de las pruebas incrementaron de 25 °C a 80 °C.

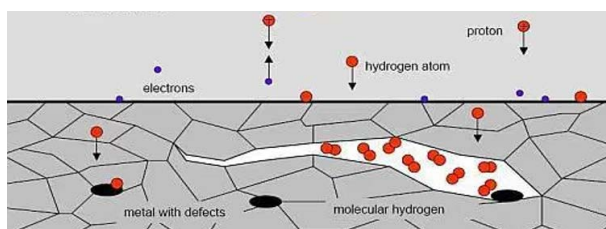
El efecto de las propiedades mecánicas fue investigado mediante pruebas de resistencia a la tensión en que la falla, a partir de los esfuerzos, representa la ductilidad. La comparación se hace entre el aumento de la concentración de hidrógeno y las



diferentes cargas del mismo. Este procedimiento de carga tiene como objetivo investigar solo el efecto del hidrógeno sobre las propiedades mecánicas, de ahí que la máxima concentración de hidrógeno alcanzada por la carga sea de alrededor de 1.84 ppm. Sin embargo, en los estudios realizados<sup>5</sup>, las concentraciones de hidrógeno analizadas después de 28 días de inmersión en el ambiente de hidrógeno alcanzaron valores de hasta 5.94 ppm. Para esto se ofrecen las siguientes explicaciones: 1) los átomos de hidrógeno, principalmente, residen en los vacíos y defectos después de que son absorbidos por el acero y la corrosión generada por el hidrógeno crea más defectos y cavidades que favorecen la residencia de los átomos de hidrógeno. 2) la reducción de tamaño de grano debilita el enlace de esfuerzo entre los granos del acero, lo cual favorece la acumulación de hidrógeno y la iniciación del agrietamiento por HE.

Los resultados obtenidos por Hejazi *et al.*<sup>4</sup>, derivados por pruebas de carga de hidrógeno en las que se cargaron probetas de acero con hidrógeno gaseoso, demuestran que había una caída del límite elástico del 0.50%, una caída del esfuerzo último del 3.70% y una caída de la ductilidad del 34.7% cuando las muestras del acero fueron cargadas con hidrógeno a concentración de 1 ppm. Para los autores hay un promedio de 1.28% de pérdida del límite elástico, una caída del 4.68% del esfuerzo último y 27.26% de reducción de la ductilidad bajo la misma concentración de hidrógeno.

**Figura 1.** Proceso difusivo del hidrógeno y posterior creación de la fisura (Oakleysteel, 2012).



Para describir las propiedades mecánicas y cuantificarlas se determinó, a partir de la Figura 1, la relación entre el límite elástico, el esfuerzo último y el esfuerzo de falla con la pérdida de masa<sup>4</sup>. Lo cual se representa por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_y = 0.3286M + 338.93 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$\sigma_u = 3.0448M + 526.25 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\epsilon_f = 0.0069M + 0.3803 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde  $\sigma_y$  es el límite elástico (MPa),  $\sigma_u$  es el esfuerzo último (MPa),  $\epsilon_f$  es el esfuerzo de falla y M la masa perdida en %.

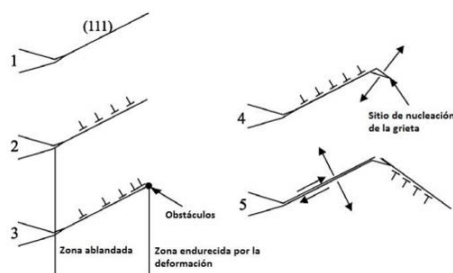
En términos generales, el estudio del fenómeno difusivo del hidrógeno permite establecer unas bases sólidas para concluir que el triángulo fundamental de la fragilización por hidrógeno es la presencia de hidrógeno en la red cristalina debido a la difusión de este y a su estructura susceptible al daño y a los esfuerzos presentes en el componente metálico. Usualmente, la resistencia a la tensión no es afectada de forma significativa por la permeación de hidrógeno. Por otra parte, la resistencia última a la tensión, la cual está relacionada con la ductilidad, es considerablemente reducida por la hidrogenación del espécimen metálico.

El efecto del hidrógeno sobre la tenacidad a la fractura se estudió por medio de ensayos CTOD (desplazamiento por apertura de la punta de grieta). El acero en estudio era un DSS SAF 2205, el proceso difusivo se dio con una carga catódica de hidrógeno, usando una densidad de corriente constante de 30 mA/cm<sup>2</sup> y una solución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La carga de hidrógeno se realizó durante 192 h, cada 28 horas se aplicó sobre la muestra una carga tensil de 10 kg. El estudio concluyó que la carga de hidrógeno tiene como consecuencia una reducción en la resistencia al crecimiento de la grieta<sup>6</sup>.

La plasticidad localizada es un fenómeno inducido por la presencia de átomos de hidrogeno, lo cual facilita el movimiento de las dislocaciones sobre ciertos planos preferenciales en la punta de la grieta. El proceso de plasticidad localizada ha sido descrito en 5 etapas, tal como lo describe Delafosse: 1) se activan los planos de deslizamiento en el punta de la grieta, 2) se genera una zona de plasticidad localizada por la presencia de hidrógeno, lo cual conlleva a 3) un aprisionamiento de las dislocaciones cerca de un obstáculo, 4) se genera la nucleación de la grieta debido al incremento localizado de las tensiones y, finalmente, 5) la grieta se abre por descohesión cizallante a lo largo del plano de deslizamiento, como lo representa Magnin *et al.* en la Figura 2.



**Figura 2.** Secuencia de la nucleación de la grieta por plasticidad localizada inducida por hidrógeno (Magnin, Chambrulle y Bayle, 1996).



Matemáticamente, lo anterior se puede materializar por medio de la ecuación 4, que describe la localización de un deslizamiento en un número limitado de planos de deslizamiento en presencia de hidrógeno:

$$\sigma_y(\varepsilon_p, c) = \sigma_0(c) \left(1 + \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0}\right)^N \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde  $\sigma_0(c)$  es la tensión de fluencia en presencia de hidrógeno,  $\sigma_0(0)$  la tensión a la fluencia en ausencia de hidrógeno y, consecuentemente,  $\varepsilon_0 = \sigma_0/E$ , siendo E el módulo elástico y N el exponente de endurecimiento. Para concluir, se determina que la tensión localizada disminuye con el aumento de la concentración del hidrógeno. El fenómeno difusivo del hidrógeno en el acero se desarrolla debido al gradiente en el potencial químico generado por una concentración heterogénea de hidrógeno en la red, o por un gradiente en la componente hidrostática del campo elástico de tensiones. La fuerza impulsora puede provenir también por la presencia de un campo eléctrico o por un gradiente de temperatura y/o presión<sup>6</sup>.

El hidrógeno se difunde desde la región de mayor potencial químico hacia la zona de menor potencial químico, al punto que se alcanza el equilibrio, es decir, cuando se tiene una concentración homogénea de hidrógeno en todo el material<sup>7</sup>.

De esta manera, el hidrógeno puede ubicarse en los intersticios de la red cristalina del acero debido a su tamaño; sin embargo, el acero cuenta con regiones de mayor afinidad para la acumulación del hidrógeno además de los intersticios de la red. Estas zonas son, entre otras, los defectos presentes en la estructura cristalina y las interfaces. La solubilidad del hidrógeno en el material se incrementa con la presencia

de trampas debido a que se crean más sitios en los que los átomos de hidrógeno se podrían ubicar. En los aceros, prácticamente cualquier defecto o imperfección en la microestructura puede considerarse como una posible trampa.

Dichas trampas pueden ser de diferentes tipos y varían según su naturaleza física. La siguiente es una clasificación propuesta por Pressouyre<sup>8</sup>: las trampas pueden ser atractivas, físicas y mixtas. Cuando un átomo de hidrógeno salta de un sitio normal de la red a una trampa, la probabilidad de retornar al sitio inicial disminuye. En la Figura 1 se puede observar este fenómeno y el fenómeno representativo de la energía necesaria para la difusión de un átomo de hidrógeno a través de la red, en distintas condiciones.

Estos tipos de trampas también se pueden clasificar según su reversibilidad: si se compara una trampa atractiva con una netamente física, para una misma profundidad de trampa, es evidente que le será mucho más fácil al hidrógeno salir de la trampa atractiva que de la física. Por lo que una trampa reversible permite la interacción libre entre el átomo de hidrógeno y la red cristalina a intervalos cortos, de tal forma que pueden dar y recibir a los átomos de hidrógeno. Por otra parte, las trampas irreversibles son consideradas sumideros de hidrógeno, debido a que el tiempo de permanencia del átomo en los intersticios de la red cristalina del acero es mucho más prolongado<sup>8</sup>. Los diferentes tipos de trampa y sus respectivas características son referenciados en la Figura 1<sup>8</sup>.

## 2. Métodos

Se toman las condiciones de la atmosfera de gasificación a partir de resultados experimentales en un reactor comercial tipo downdraft. Para ello se tiene en cuenta la composición gaseosa y la temperatura al interior de este. Se construye, un modelo matemático para evaluar la profundidad de permeación del hidrógeno, ajustado para aceros al carbono de bajo carbono (%C < 0.3%), se determinan los parámetros para la modelación de las condiciones cinéticas de difusión del hidrógeno en el material para aceros de bajo carbono. La medida de la permeación del hidrógeno brinda información acerca de la solubilidad y velocidad de transporte de este en algunos materiales; sin embargo, otros modelos matemáticos han sido desarrollados con la finalidad de explicar la difusión del hidrógeno en aceros basados en la primera y segunda ley de Fick. Los experimentos de difusión en estado transitorio son generalmente descritos por la segunda ley de Fick, descrita en las ecuaciones 5 y 6:



$$\frac{\partial c_H}{\partial t} + \frac{\partial c_{ft}}{\partial t} = D_H \left( \frac{\partial^2 c_H}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\frac{\partial c_H}{\partial t} = \frac{D_H}{1 + \left( \frac{\partial c_{ft}}{\partial c_H} \right)} \left( \frac{\partial^2 c_H}{\partial x^2} \right) \quad (\text{Ec. 6})$$

Una comparación con la fórmula usual de la segunda ley de Fick muestra que, en presencia de trampas planas, se observa una difusividad efectiva del hidrógeno la cual esta descrita en la ecuación 7:

$$D_{eff} = \frac{D_H}{1 + \left( \frac{\partial c_{ft}}{\partial c_H} \right)} = \frac{D_H}{1 + \alpha} \quad (\text{Ec. 7})$$

El coeficiente de difusión del hidrógeno para aceros usa la correlación experimental ajustada para aceros de abajo carbono (ecuación 8)<sup>9</sup>:

$$D_H = 5.12 \times 10^{-4} e^{-\frac{4.15 \text{KJmol}^{-1}}{RT}} \quad (\text{Ec. 8})$$

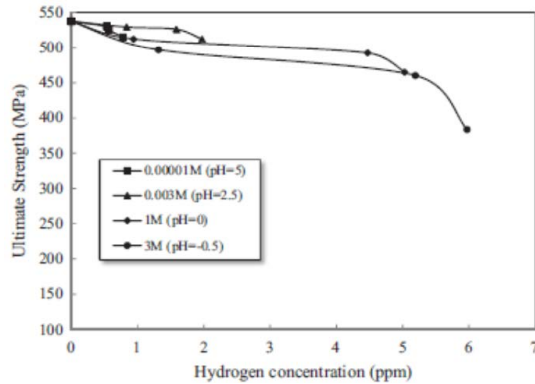
La solución analítica de la ecuación de difusión para este caso se expresa en términos de la función error (ecuación 9):

$$c(x, t) = (C_o - C_s) * \text{erf} \left( \frac{x}{2(\sqrt{D_H t})} \right) + C_s - r_o \quad (\text{Ec. 9})$$

Esta ecuación se soluciona codificando la solución en Matlab, con el fin de obtener las concentraciones de hidrógeno permeadas en el material.

Se estima que el cambio de propiedades mecánicas<sup>10</sup> por efecto del hidrógeno en aceros de bajo carbono es sensible a la concentración de masa de hidrógeno permeada (ppm H<sub>2</sub>). Cuando la concentración de hidrógeno es mayor a 5.97 ppm, la resistencia a la tensión *sy* puede reducirse hasta en un 13.5%, mientras que la resistencia última decae hasta en un 28.64%, siendo estos los mayores valores registrados en este estudio los cuales se tomarán como referencia ajustando la condición crítica.

**Figura 3.** Variación del esfuerzo ultimo con la concentración de hidrógeno en acero templado.



Mediante el análisis de los elementos finitos empleando la herramienta SOLID WORKS (Versión educativa) se determinan los esfuerzos de operación de la tolva, ajustando las condiciones de frontera como se muestra en la Figura 5. Un análisis térmico determina la distribución de temperaturas en la tolva, tomando como referencias las temperaturas medidas en la zona del cuello  $T=1300$  k y la temperatura del soporte superior  $T=500$  k.

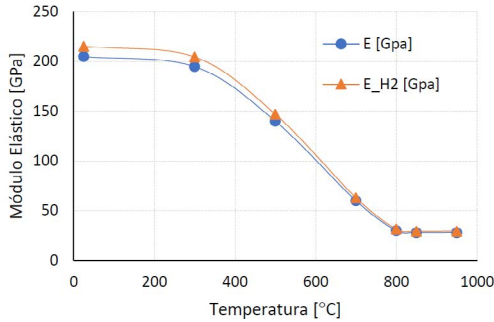
Para tener en cuenta los esfuerzos, dados los niveles de temperatura de la materia, el módulo de elasticidad del acero es corregido por la temperatura.

Se compararán dos escenarios para evaluar el efecto del hidrógeno al tomar como criterio de falla la fatiga de bajo ciclaje, debido a deformaciones por temperatura (ecuación 10):

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_i)^b + \varepsilon_f' (2N_i)^c \quad (\text{Ec. 10})$$



**Figura 4.** Módulo de elasticidad corregido por temperatura y ajustado para endurecimiento por H2



Dado que es importante relacionar los coeficientes con las propiedades que son afectadas por el hidrógeno (Módulo elástico y Resistencia última), se toman las siguientes correlaciones: en términos de la dureza del material;  $\sigma'_f = 4,25 HB + 225 Mpa$ ,  $\epsilon'_f = 0,32HB^2 - 487HB$ ,  $b = -0,09$ ,  $c = -0,59$  en términos el esfuerzo último:  $\sigma'_f = 1,5S_U$ ,  $\epsilon'_f = 0,45$ ,  $b = -0,09$ ,  $c = -0,59$ . Para este trabajo se toman los resultados de la media de aceros<sup>17</sup>.

Generalizando la relación se obtiene:

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.5 \frac{S_U}{E} (2N_i)^{-0.09} + 0.45(2N_i)^{-0.59} \tag{Ec.11}$$

Para el caso del material afectado por el hidrógeno y considerando una reducción de la resistencia última del material en 28.64%, además de un aumento en el módulo elástico del 5%, se obtiene la siguiente relación.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = 1.5 \frac{(1 - 0.2864)S_U}{E_{H_2}} (2N_i)^{-0.09} + 0.45(2N_i)^{-0.59} \tag{Ec.12}$$

Donde  $E_{H_2}$  es el nuevo módulo elástico  $E_{H_2} > E$  incrementado por el endurecimiento por hidrógeno, que para este estudio es  $E_{H_2} = 1.05E$ .

La relación para el factor de intensidad de esfuerzo KIC ha sido discutida durante varios años y existen varios modelos para su determinación, por medio de los ensayos que se encuentran normalizados. En la Figura 3, se pueden apreciar las curvas de propagación de fisura para el acero 4130 expuesto a hidrógeno<sup>18</sup>.

Para estimar el valor de KIC se han realizado ensayos de tenacidad a la fractura con el estándar ASTM E399<sup>15</sup>, los cuales reportan que en aceros de alta resistencia CrMo, al representar las curvas JR se evidencia el comportamiento frágil del metal tras el efecto del hidrógeno<sup>14</sup>.

Otros autores relacionan la dureza con el factor de esfuerzo, por medio del ensayo Charpy (ASTM E23) (ASTM, 2016) aunque este procedimiento genera correlaciones imprecisas<sup>18</sup>. Sin embargo, estudios en acero 1020 revelan un incremento de la dureza a mayor concentración de hidrógeno y reducción en valor de KIC<sup>21,22</sup>.

Para relacionar el KIC con la microdureza (Vickers), se puede usar la relación desarrollada por Antis y Lawn<sup>23,24</sup>.

$$K_{IC} = \frac{\chi_r P}{c_o^{3/2}} = 0.0154 \left( \frac{E}{H} \right)^{1/2} \left( \frac{P}{c^{3/2}} \right) \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde c es la longitud de la grieta creada por la indentación, para lo cual se necesita instrumentación muy precisa.

Según los perfiles de permeación de hidrógeno evaluados, después de 100 horas de operación de la planta, la permeación alcanza la totalidad del espesor de placa (4 mm), como se observa en la Figura 5. Debido a que ambos lados de la placa están en contacto con el gas, la permeación se da en ambas direcciones siendo a 2 mm, un valor medio aproximado a 2.7 ppm, lo cual lleva, a más del 95% del material, a concentraciones de hidrógeno superiores a 6 ppm.

**Figura 5.** Condiciones operativas del componente crítico del gasificador.

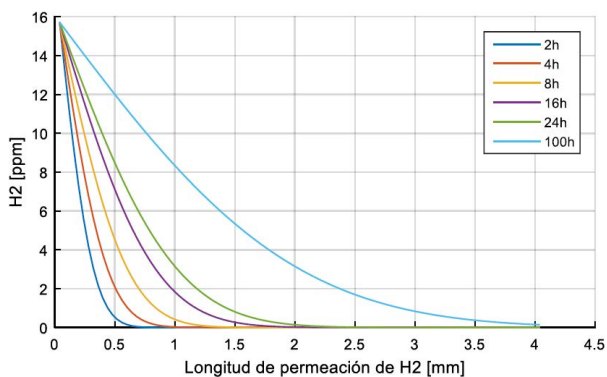




### 3. Resultados y discusiones

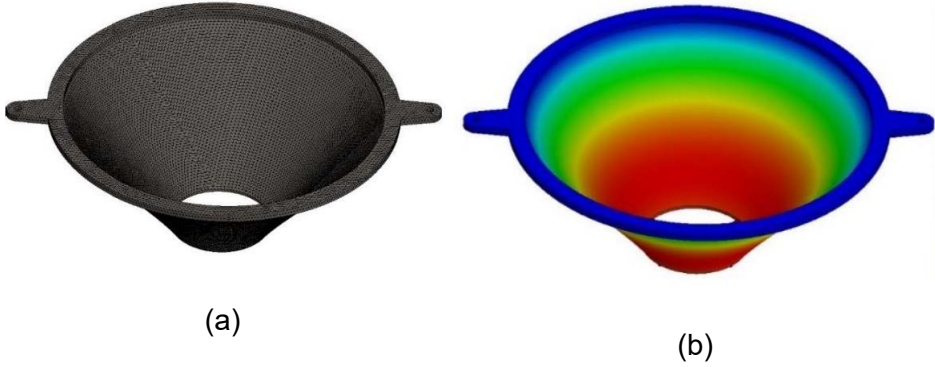
La figura 6 indica el perfil de concentración de hidrogeno computado como es afectado por el tiempo de exposición llegando a penetraciones hasta de 2 mm en tiempos de dos horas. Todas las curvas alcanzan un equilibrio que obedece a la naturaleza disipativa del fenómeno.

**Figura 6.** Permeación de hidrógeno en el acero.

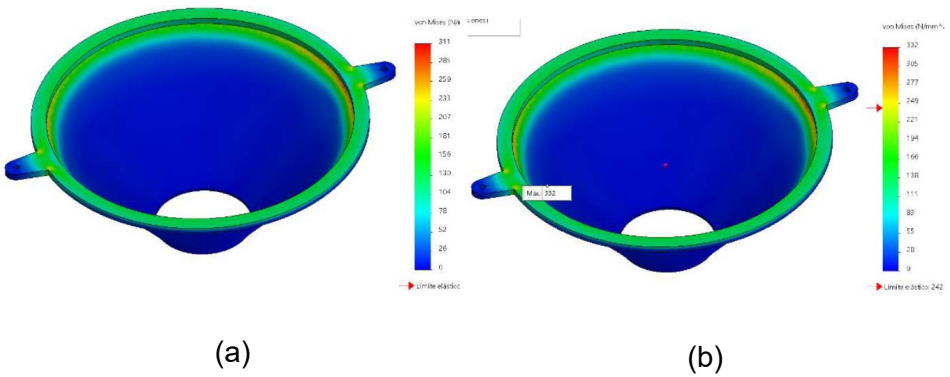


La Figura 7 (a) muestra el mallado del modelo evaluado, se observa una homogenización de la malla manteniendo tamaños homogéneos. La solución de temperatura se muestra en la figura 7 (b), esta junto a la restricción de movimiento del apoyo rígido en las condiciones de frontera detalladas en la Figura 5. Tanto las temperaturas Estos dan como solución los esfuerzos generados en la tolva con y sin permeación de hidrogeno tal como se detalla en la Figura 8 (a) y figura 8 b respectivamente.

**Figura 7.** Elemento con malla (a), Solución temperatura (b)



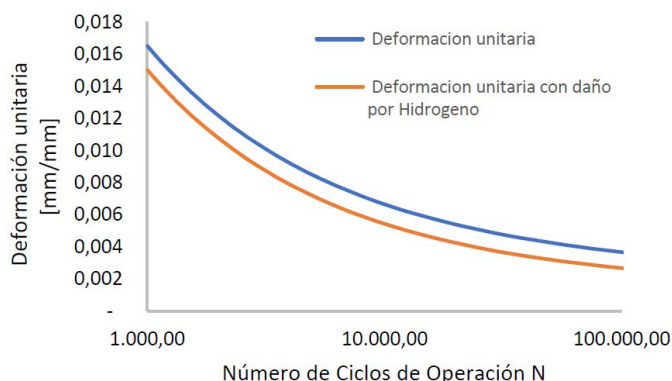
**Figura 8.** Solución campo de esfuerzos de Von Mises.(a) sin H2, (b) con H2



Dado que el hidrógeno afecta la dureza y la rigidez del material, se lleva a cabo un análisis de fatiga, tal como se muestra en la figura 9. En esta, se observa que las deformaciones unitarias disminuyen como resultado del aumento en la rigidez y de la fragilización causada por el hidrógeno. Este fenómeno altera los enlaces interatómicos, generando concentradores de esfuerzos que reducen el área efectiva y aumentan el esfuerzo relativo en zonas localizadas. Como consecuencia, se facilita la propagación de grietas, la coalescencia de estas y, finalmente, la falla de la pieza<sup>19-21</sup>.



**Figura 9.** Solución campo de deformaciones unitarias con H<sub>2</sub>.



Finalmente, en la Tabla 1, se refleja impacto significativo del hidrógeno en las propiedades mecánicas del acero 1020, mostrando una notable reducción en la resistencia máxima, el límite de elasticidad y la tenacidad, con disminuciones del 28%, 16% y 44%, respectivamente, lo que evidencia la fragilización por hidrógeno. En el análisis de esfuerzos y deformaciones, aunque el esfuerzo de Von Mises aumenta bajo la presencia de hidrógeno, la deformación unitaria redujo a un 6%, indicando un comportamiento más rígido. En cuanto a la fatiga, ambos casos superan los 100,000 ciclos, sugiriendo una duración infinita sin tener en cuenta otros criterios de falla, no obstante la fragilización por hidrógeno podría ser crítica al considerar la propagación de grietas desde defectos iniciales.

**Tabla1.** Resumen de resultados

Parámetro	Acero 1020	Acero 1020 con H2	Observación
<b>Propiedades afectadas por el H2</b>			
$\sigma_U$ [Mpa]	490	352	Reduce en 28% por H2
$\sigma_y$ [Mpa]	351	297	Reduce en 16% por H2
Tenacidad [Mpa.m <sup>1/2</sup> ]	108	60	Reduce en 44% por H2
Resultados análisis de esfuerzos y deformaciones			
$\sigma_{VM}$ [Mpa]	311	332	Falla dúctil con H2
[mm/mm]	0.0017	0.0016	Deformación reduce en 6% con H2
Evaluación de fatiga (deformaciones térmicas)			
Duración N (ciclos)	>100000	>100000	No fatiga: mayor a 100 años ambas.
Evaluación por falla frágil (asume grieta inicial 0.5mm)			

## 4. Conclusiones

Los datos obtenidos en los estudios realizados por diversos autores muestran un comportamiento similar para varios tipos de acero en presencia de hidrógeno. En general, las propiedades mecánicas disminuyen al someter el material a una atmósfera que incluya hidrógeno. Algunos de esos datos se encuentran en el Apéndice A. Según datos experimentales tomados de la bibliografía, la tendencia para todos los aceros es que el esfuerzo último disminuya. En el acero 1020 se registra una reducción del 28%.

Para los aceros estudiados, inoxidable y de alta resistencia, la tenacidad a la fractura disminuye. Para el acero 1020 se registra una reducción del 44%, siendo esta la propiedad que más se muestra afectada, debido al mecanismo de difusión del hidrógeno y a la manera en que afecta las dislocaciones y el tamaño de grano, lo cual incide en la propagación de la fisura, como fue explicado en la Introducción. Al analizar por fatiga, mediante el método de bajo ciclaje, y estimar el campo de deformaciones unitarias, no se observa una diferencia notable en el ciclo de vida útil. Por lo tanto, los componentes del reactor con acero 1020 no deberían fallar por fatiga.

Aunque se han tomado datos de otros autores para evaluar el daño por hidrógeno, es necesario realizar pruebas de micro dureza en muestras sometidas a una atmósfera con hidrógeno en un reactor de biomasa operativo. En estos reactores los gases tienen una concentración de hidrógeno de 15%. Pero también en carbón, por lo cual no será posible prescindir del efecto de endurecimiento inducido por la presencia del carbono en aceros dúctiles.

Para una evaluación más completa y una predicción más precisa, como futuro trabajo de investigación debería realizarse un ensayo de tenacidad a la fractura y de micro dureza a las muestras sometidas al reactor de biomasa, de tal manera que permita que se retroalimenten los diseños con la intención de contrarrestar los efectos mecánicos de la permeación de hidrógeno.



## Referencias

1. D. Flórez, "Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación de cuesco de palma de aceite pele-tizado," Artículo de Revisión, pp. 210, 2016.
2. R.M. Horn, R. J. Kar, V. F. Zackay, & E.R. Parker "The Design of Steels for Coal Gasification Pressure Vessels". *Journal of Materials for Energy Systems.*, vol. 1, pp. 77–92, 1979. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF02833992>
3. M. Koyama, E. Akiyama, Y. K. Lee, D. Raabe, and K. Tsuzaki, "Overview of Hydrogen Embrittlement in High-Mn Steels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 17, pp. 12706–12723, 2017.
4. D. Hejazi, A. Calka, D. Dunne, & E. Pereloma. "Effect of Gaseous Hydrogen Charging on the Tensile Properties of Standard and Medium Mn X70 Pipeline Steels". *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, vol. 32, no 7, pp. 675–683, 2016. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/02670836.2015.1130331>
5. L. Li, M. Mahmoodian, C. Q. Li, and D. Robert, "Effect of Corrosion and Hydrogen Embrittlement on Microstructure and Mechanical Properties of Mild Steel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 170, pp. 78–90, 2018.
6. A. M. Pérez Ceballos, "Estudio de la difusión y fragilización por hidrógeno de un acero inoxidable dúplex (Revisión Bibliográfica)," Tesis Doctoral en Ingeniería: Universidad de Antioquia, 2015.
7. G. A. Zafra, "Estudio de la difusividad y del agrietamiento por hidrógeno en aceros estructurales," pp. 1–120, 2016.
8. G. M. Pressouyre. "A Classification of Hydrogen Traps in Steel". *Metallurgical Transactions A.*, vol. 10 no. 10, pp. 1571–1573, 1979. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/BF02812023>
9. S. K. Yen and I. B. Huang, "Critical hydrogen concentration for hydrogen-induced blistering on AISI 430 stainless steel," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 80, no. 3, pp. 662–666, 2003.
10. A. Albístur-Goñi and J. Fernández-Carrasquilla, "Análisis de la absorción de hidrógeno y de su influencia en el comportamiento mecánico de cinco aleaciones férricas," *Rev. Metal.*, vol. 44, no. 2, pp. 113–128, 2008.
11. L. L. N. Cuadrado, D. Casellas, J. Caro, "Caracterización mecánica mediante la técnica De nanoindentación de partículas duras," *Anales de Mecánica de La Fractura.*, vol. 2, pp. 566–571, 2009.
12. M. B. Djukic et al., "Towards a Unified and Practical Industrial Model for Prediction of Hydrogen Embrittlement and Damage in Steels," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, pp. 604–611, 2016.
13. G. Rosenberg and I. Sinaiova, "Evaluation of Hydrogen Induced Damage of Steels by Different Test Methods," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 682, pp. 410–422, 2017.

14. A. Cheng and N. Z. Chen, "Corrosion Fatigue Crack Growth Modelling for Subsea Pipeline Steels," *Ocean Eng.*, vol. 142, no. April, pp. 10–19, 2017.
15. E. Grabke, H. J., & Riecke, "Absorption and Diffusion of Hydrogen in Steels," *Mater. Tehnol.*, vol. 34, no. 6, p. 331, 2000.
16. L. Li, M. Mahmoodian, C. Q. Li, and D. Robert, "Effect of Corrosion and Hydrogen Embrittlement on Microstructure and Mechanical Properties of Mild Steel," *Constr. Build. Mater.*, vol. 170, pp. 78–90, 2018
17. M. A. Meggiolaro and J. T. P. Castro, "Statistical Evaluation of Strain-Life Fatigue Crack Initiation Predictions," *Int. J. Fatigue*, vol. 26, no. 5, pp. 463–476, 2004.
18. T. L. Anderson. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 2005. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1740-4>
19. R. Documents, S. Factor, P. F. Toughness & C. P. Orientation. "Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness  $K_{Ic}$  of". *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1–33, 2011. Disponible en: <https://doi.org/10.1520/E0399-09E02.2>
20. L. B. Peral, A. Zafra, C. Rodríguez, and J. Belzunce, "Evaluation of Strength and Fracture Toughness of Ferritic High Strength Steels under Hydrogen Environments," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 5, pp. 1275–1282, 2017
21. M. B. Djukic, V. Sijacki Zeravcic, G. M. Bakic, A. Sedmak, and B. Rajcic, "Hydrogen Damage of Steels: A Case Study and Hydrogen Embrittlement Model," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 58, pp. 485–498, 2015.
22. M. Wasim and M. B. Djukic, "Hydrogen Embrittlement of Low Carbon Structural Steel at Macro-, micro- and Nano-levels," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 3, pp. 2145–2156, 2019.
23. G.R. Antis, P. Chantikul, B. R. R. LAWN, G. R. ANSTIS, P. Chantikul, D. B. MARSHALL. "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements". *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 46, pp. 533–538, 1981. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1981.tb10320.x>
24. D. B. Marshall, B. R. Lawn & A. G. Evans. "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: The Lateral Crack System". *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 65, no. 11, pp. 561–566, 1982. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1982.tb10782.x>
25. Y. Tsuchida, T. Watanabe, T. Kato, y T. Seto, "Effect of hydrogen absorption on strain-induced low-cycle fatigue of low carbon steel", *Procedia Eng.*, vol. 2, núm. 1, pp. 555–561, 2010.
26. N. Eliaz, A. Shachar, B. Tal, y D. Eliezer, "Characteristics of hydrogen embrittlement, stress corrosion cracking and tempered martensite embrittlement in high-strength steels", *Eng. Fail. Anal.*, vol. 9, núm. 2, pp. 167–184, 2002.
27. M. Wasim y M. B. Djukic, "Hydrogen embrittlement of low carbon structural steel at macro-, micro- and nano-levels", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, núm. 3, pp. 2145–2156, 2019.

**Economía circular y sostenibilidad,  
gestión - Optimización de procesos y  
confort térmico y eficiencia energética**

# Estado actual de circularidad en una empresa mediana del departamento del Atlántico: caso de estudio

Sandra Margarita Villa Marengo<sup>\*\*</sup>  
María Bernarda Alvarado Bawab<sup>\*</sup>

---

\* Institución Universitaria de Barranquilla, Ingeniería Industrial.  
svilla@unibarranquilla.edu.co; mbalvarado@unibarranquilla.edu.co

\*\* Autora para correspondencia.

## Resumen

Con este trabajo se busca conocer la dinámica de una empresa mediana exportadora, ubicada en Barranquilla – Atlántico, que transita hacia un entorno sostenible a partir de la identificación de su nivel de circularidad. Para esto se estudian criterios relacionados con los procesos internos y externos a la empresa, criterios de mercados verdes, ambientales, tecnológicos y regulatorios, mediante entrevistas a expertos de la empresa, y la revisión de documentación tanto interna como pública. Todo esto sirve de base para establecer el rol de la empresa dentro de sus stakeholders frente a la circularidad. Se encontró que, aunque el nivel de circularidad 3.5 hace referencia a una empresa circular, no refleja completamente la realidad, ya que este nivel se alcanza principalmente como resultado de las exigencias impuestas por los proveedores y las regulaciones gubernamentales, más que por iniciativas propias de la organización. Además, las acciones internas se ejecutan como parte de un sistema de gestión de calidad enfocado en el mejoramiento continuo. Se recomienda fortalecer la conciencia ambiental interna, impulsar el desarrollo tecnológico y promover la longevidad de los productos

**Palabras clave:** circularidad, mercados verdes, procesos, regulación, tecnología.

## Abstract

This work seeks to understand the dynamics of a medium-sized exporting company located in Barranquilla - Atlántico towards a sustainable environment from the identification of its level of circularity. For this purpose, criteria related to internal and external processes, green markets, environmental, technological and regulatory criteria are studied through interviews to experts of the company, internal and public documentation. All this is used as a basis for establishing the role of the company within its stakeholders with regard to circularity; it was found that, although circularity level 3.5 refers to a circular company, it does not correspond to reality since it is reached as a result of suppliers' requirements and government regulations. Internal actions are carried out as a necessity within a quality management system that promotes continuous improvement. It is recommended to strengthen internal environmental awareness and technological development, as well as to strive for product longevity.

**Keywords:** Circularity, Green Market, Processes, Regulation, Technology.



## I. Introducción

Como consecuencia de la rápida industrialización, las empresas se han enfrentado a varios retos medioambientales, como el calentamiento global, la escasez de recursos y la contaminación ambiental<sup>1</sup> producto del sistema de producción tradicional de economía lineal, que consiste en extraer, transformar, producir, consumir y descartar. Sin embargo, se ha vuelto esencial la adopción de estrategias que reduzcan los impactos ambientales, inicialmente centrados en las denominadas 9R: rechazar, repensar, reducir, reutilizar, reparar, restaurar, remanufacturar, reutilizar, reciclar y recuperar<sup>2</sup>.

La economía circular se reconoce como estrategia importante para abordar los problemas ambientales, maximizar el valor de los materiales utilizados en los ciclos de producción y consumo y eliminar los desechos<sup>3</sup>. Esta estrategia se ha masificado y es aplicada con metodologías empíricas en las empresas centradas en el plano de la necesidad económica y cumplimiento de requisitos legales<sup>4</sup> y, solo después, en la mitigación de impactos medioambientales<sup>1</sup>. Sin embargo, algunas de las metodologías presentan falencias en sus estrategias de medición, porque se centran únicamente en las acciones realizadas al interior de las organizaciones para reducir el consumo de materias primas, residuos generados, uso de materiales no renovables<sup>5,6</sup> y de la longevidad de los productos<sup>7</sup>; otros también consideran el daño ambiental<sup>8</sup>, teniendo en cuenta la durabilidad del producto y la interacción con los involucrados en dicho proceso de fabricación.

Recientemente se ha publicado un kit de herramientas para la evaluación de la circularidad en pymes manufactureras, y se han tenido en cuenta los aspectos sociales y ambientales enmarcados en 9 criterios, que son: prácticas internas de utilidad de los recursos y porcentaje de eficiencia, porcentaje de conciencia interna, porcentaje de prácticas externas, porcentaje de longevidad para practicas externas, porcentaje de apoyo a la cadena de valor, porcentaje de conciencia externa, porcentaje de desarrollo de legislación, porcentaje de desarrollo tecnológico, porcentaje de desarrollo del mercado verde<sup>9</sup>. No obstante, el nivel de circularidad debe ir más allá de una sola organización, extendiéndolo a todas las empresas interconectadas con la organización.

Luego de múltiples experiencias, proyectos y esfuerzos, las políticas de economía colaborativa han sido seleccionadas como la dimensión central del desarrollo sostenible. En esta política de economía colaborativa, la sociedad, el medio ambiente, la economía y las empresas juegan un papel importante, pues están enmarcadas

en políticas de estado y acuerdos internacionales; por tal razón, la medición de la circularidad debe tener en cuenta como la organización se relaciona con los involucrados y las estrategias emprendidas deben ser consideradas como oportunidades para la economía y la competitividad empresarial<sup>1</sup>. Es así como el modelo empleado en este proyecto representa un enfoque holístico, fundamentado tanto en el proceso de fabricación como en los aspectos sociales y ambientales que le dan un sentido sostenible<sup>10</sup>.

Las barreras del conocimiento operativo de economía circular<sup>11</sup> y los procedimientos legales administrativos son brechas que restringen la aplicación de estrategias circulares en las organizaciones del departamento del Atlántico<sup>4</sup>. De ahí que se requieran programas de capacitación sobre las teorías de las transiciones sociotécnicas sostenibles, de tal manera que se refleje en la comprensión de la interdependencia entre los factores culturales, el comportamiento de los mercados y las directrices políticas o regulatorias, para lograr desplazar los regímenes lineales establecidos; de igual forma, se resalta el papel de los gobiernos, quienes deben proporcionar condiciones que fomenten las innovaciones sostenibles<sup>3</sup> y promover prácticas de colaboración entre países avanzados y países en vía de desarrollo en materia de sostenibilidad<sup>1,3</sup>.

Ahora bien, aumentar la cobertura de los aspectos a considerar en la medición de la economía circular a toda la cadena de valor (adquisición, diseño, producción, distribución, uso, reutilización, reacondicionamiento, refabricación y reciclado) permitirá identificar las necesidades y expectativas de todos los agentes; esto facilitará la elaboración de lineamientos para la financiación de proyectos de economía circular con altas probabilidades de éxito e innovación<sup>1,4,9,10</sup>.

El presente artículo se focaliza en reconocer las fortalezas y oportunidades de mejora de una empresa del sector industrial que está dedicada al procesamiento de alimentos, evaluando criterios internos y externos, la regulación, la cadena de valor, el desarrollo de mercados verdes y tecnológicos. Lo anterior, a partir de la metodología propuesta en la literatura basada en los modelos de Ellen MacArthur Foundation y Grata Design (2015), Di Maio y Rem (2015), Park y Chertow (2014), Li y Su (2012), Genovese *et al.* (2017), Wen y Meng (2015), Scheepens, Vogtlander y Brezet (2016), y Elia, Gnoni y Tornese (2017)<sup>9</sup>.



## 2. Métodos

Este es un estudio de tipo cuantitativo y documental. El tipo de investigación es no experimental transversal, que por la condición cuantitativa que posee son “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural, para después analizarlos”<sup>12</sup>. Se ha elegido este enfoque porque la investigación cuantitativa tiene como finalidad la obtención de respuestas a preguntas específicas, y basa sus estudios en números estadísticos para dar respuesta a unas causas y efectos concretos.

En este estudio se obtienen datos empíricos para, así, tener conocimiento de las características que son objeto de estudio directamente de los sujetos que participan de la economía circular en la empresa objeto de estudio. En este caso la fuente primaria estuvo constituida por personal de cargos directivos y la información fue justificada en documentación aprobada por la alta gerencia.

La empresa seleccionada es de naturaleza privada, de tamaño mediano, con mercado objetivo internacional, en el sector del diseño, la fabricación y la distribución de productos naturales con aplicaciones farmacéuticas y de suplementos dietéticos, con base en aceites marinos obtenidos de diferentes especies de peces. Esta organización se encuentra ubicada en la ciudad de Barranquilla y su presencia en el mercado data de hace 15 años.

Para la obtención de información directa, se aplicó una entrevista semiestructurada que se caracterizó por su flexibilidad para obtener una narración libre de los entrevistados y para enfocarse en los temas de interés. Conforme se fueron obteniendo los datos, se indagó más en algunos de los temas mencionados por los entrevistados, lo cual propició un escenario más amplio de cada contexto, estableciendo respuestas cerradas para cada pregunta y categorizadas en “sí”, “no” o “no aplica”.

El instrumento de medición aplicado se basó en el kit de herramientas para la medición de la circularidad en la industria manufacturera<sup>9</sup>, el cual evalúa los siguientes criterios.

- Criterio A. Porcentaje de utilidad y eficiencia de recursos en las prácticas internas. ( $C_A$ )
- Criterio B. Porcentaje de conciencia interna. ( $C_B$ )
- Criterio C. Criterio A + Criterio B. ( $C_C$ )
- Criterio D. Porcentaje de conciencia externa. ( $C_D$ )
- Criterio E. Porcentaje de apoyo a la cadena de valor. ( $C_E$ )

- Criterio F. Porcentaje de longevidad por prácticas externas. ( $C_F$ )
- Criterio G. Porcentaje de desarrollo de mercados verdes. ( $C_G$ )
- Criterio H. Porcentaje de desarrollo tecnológico. ( $C_H$ )
- Criterio I. Porcentaje de desarrollo de la legislación. ( $C_I$ )

Para establecer el nivel de circularidad, se calculan porcentajes de cumplimiento en cada uno de los criterios, a partir de la sumatoria de cada una de las opciones de respuesta del cuestionario aplicado para el criterio ( $\sum C_i^a$ ) entre la cantidad de preguntas totales de dicho criterio ( $n = n_{C_i}$ ), donde  $a$  corresponde a la categoría obtenida de las respuestas, tal como se presenta en la ecuación 1.

$$\% C_i^a = \frac{\sum C_i^a}{n_{C_i}} \quad (\text{Ec. 1})$$

Cada criterio corresponde al peso unitario como aporte a la circularidad. Para la obtención del peso unitario el porcentaje obtenido en la categoría SI debe corresponder a más del 50%. Si corresponde exactamente al 50% el criterio obtendrá un peso de 0,5 y de ser menor se obtendrá un peso nulo. Posteriormente, para la definición del nivel de circularidad se aplicó el modelo propuesto por Garza-Reyes *et al.*<sup>9</sup>, que tiene en cuenta la priorización de las practicas internas y externas como criterios indispensables en la ponderación, como se presenta en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Nivel de circularidad y su descripción

Rango	Fórmula	Tipo de empresa	Descripción
6,5 - 8	$C_c + C_d + C_e + C_f + C_g + C_h + C_i$	Desarrollador circular	Organizaciones líderes en la implementación de CE, con el compromiso/capacidad de ir un paso más allá para participar en el desarrollo de nuevas tecnologías y regulaciones ambientales que puedan beneficiar y mejorar la circularidad.
5,5 - 6	$C_c + C_d + C_e + C_f + C_g$	Promotor circular	Organizaciones que han integrado con éxito la CE en su estrategia comercial y que realmente están satisfaciendo a los clientes y haciendo crecer el mercado circular con conciencia ambiental.



Rango	Fórmula	Tipo de empresa	Descripción
3,5 – 5	$C_c + C_d + C_e + C_f$	Circular	Organizaciones que han integrado plenamente las prácticas de CE en su negocio y su cadena de valor, incluidas las actividades relacionadas con la adquisición circular y el aumento de la longevidad con clientes, proveedores y otras empresas.
2,5 – 3	$C_c + C_d$	Ondulado	Organizaciones que están iniciando la concientización externa e introduciendo los principios de CE a los clientes y la cadena de suministro, para promover la CE en toda la cadena de valor.
2 – 2	$C_c = C_a + C_b$ Donde $C_a = 1$ y $C_b = 1$	Curvado	Organización que ha integrado plenamente las prácticas de CE y ha adoptado la circularidad como cultura. Sin embargo, los esfuerzos sólo se realizan internamente y no se realizan prácticas con el apoyo de clientes, proveedores, otras empresas o competidores.
1 - 1,5	$C_c = C_a + C_b$ Donde $C_a = 0,5 - 1$ y $C_b = 0,5 - 1$	Diente de sierra	Las organizaciones que han introducido algunas prácticas importantes de CE dentro de su empresa, reconocen las mejoras y están en el proceso de adoptarlas como parte de su cultura.
0,5 – 1	$C_c = C_a + C_b$ Donde $C_a = 0$ y $C_b = 0,5 - 1$	Forma de V hacia arriba	Las organizaciones que no han aplicado ninguna práctica de CE, sin embargo, sienten curiosidad al respecto y están comenzando a aprender los beneficios que esto les puede traer. Generalmente, porque un miembro de la alta dirección es una persona que tiene conciencia medioambiental.
0,5 – 1	$C_c = C_a + C_b$ Donde $C_a = 0,5 - 1$ y $C_b = 0$	Forma de V hacia abajo	Organizaciones que, sin darse cuenta, ya están aplicando algunas prácticas internas de EC, generalmente, relacionadas con el consumo, utilización y eficiencia de recursos. No conocen la EC, sin embargo, se dieron cuenta de que se pueden obtener beneficios económicos con la adopción de determinadas prácticas.
0 - 0	Lineal = 0	Lineal	Organizaciones que aplican un enfoque lineal sin ningún conocimiento sobre EC. Caracterizados por ser negocios enfocados en los beneficios económicos que cumplen con los requisitos mínimos gubernamentales o legislativos para poder operar.

### 3. Resultados y discusiones

La empresa objeto de estudio busca diseñar, fabricar y distribuir productos naturales con aplicaciones farmacéuticas y, también, suplementos dietéticos para satisfacer las necesidades de los clientes, apoyándose en la tecnología, el talento humano, la seguridad en el trabajo, y garantizando la rentabilidad y sostenibilidad bajo un enfoque de responsabilidad social. De igual forma, hacen parte de la marca "*Friends of the Sea*", registrada en misiones humanitarias y conservación ambiental, lo que reafirma su compromiso de respetar y proteger el ambiente marino, asegurar la pesca responsable y la sostenibilidad de los recursos.

La empresa cuenta con certificaciones como: Excelencia en el proceso de fabricación y calidad; Certificación líder para productos que respetan y protegen el medio ambiente marino; Aprobación reglamentaria de los Estados Unidos de América para complementos nutricionales; Autorización de seguridad alimentaria para musulmanes; Alianza empresarial para un comercio seguro; es miembro de la organización Global EPA y DHA GOED; el INVIMA verifica que la empresa cuenta con la instalación, los métodos, los equipos, las instalaciones y los controles adecuados y alineados para producir Omega-3; además cuentan con la Aprobación reglamentaria de ANVISA en Brasil para producir suplementos nutricionales.

En la Tabla 2 se presentan los resultados relacionados con las practicas internas de la empresa, que involucran los aspectos de diseño, producción, envasado y distribución. Da información sobre los materiales, procesos, residuos energéticos y las emisiones<sup>9</sup>.

**Tabla 2.** Resultados del porcentaje de Prácticas internas - Utilidad y eficiencia de los recursos

<b>Criterio A</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
A.a) Diseño del producto que reduzca el consumo de recursos.	0	2	2
A.b) Diseñar productos para la reutilización, el reciclaje y la recuperación de materiales y componentes.	12	0	0
A.c) Diseñar procesos para minimizar los residuos.	2	0	0
A.d) Diseñar productos duraderos.	2	0	0
A.e) Material reductor (es decir, materia prima y/o agua).	15	0	0



<b>Criterio A</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
A.f) Reducción del consumo de energía (electricidad, carbón, gas).	7	0	7
A.g) Utilización de materiales y energía renovables en el proceso de producción de materiales no renovables.	7	0	7
A.h) Reducción de emisiones contaminantes.	15	0	0
A.i) Reducción de residuos.	10	2	0
A.j) Envasado.	0	0	2
A.k) Distribución.	0	0	5
<b>TOTAL</b>	<b>71</b>	<b>5</b>	<b>24</b>

En la Tabla 2 se evidencia que la empresa tiene como enfoque principal la etapa de diseño y producción para la ejecución de acciones sostenibles, lo que guarda correspondencia con lo esperado en la metodología del Análisis de Ciclo de Vida. Se evidencia, además, que la adquisición de materias primas se realiza mediante los proveedores que cuentan con certificaciones ambientales y que cumplen con los procesos regulatorios establecidos en el país de origen. La empresa busca garantizar que la cadena de suministro sea ambientalmente responsable desde el inicio. Lo anterior se sustenta en que, desde la etapa de diseño del producto, se planifica y controla el uso de materias primas, se realiza el seguimiento a las regulaciones exigidas por la ley, y se construyen e implementan programas para el llevar a cabo buenas prácticas de manufactura, control de costos y extensión de la durabilidad de los productos.

En la Tabla 3 se presentan los resultados encontrados sobre el porcentaje de conciencia interna, el cual tiene por objetivo identificar las acciones o esfuerzos internos con relación a la formulación y el intercambio de una estrategia circular al interior, y con el apoyo de las partes interesadas, mediante la adopción de la cultura de la circularidad y su comprensión como un proceso de mejora continua, la utilización de las tecnologías de la información; el establecimiento de objetivos ambientales por empleado y evaluación como parte del desempeño de los empleados, la medición/seguimiento de riesgos ambientales, impactos, regulaciones y actividades de mitigación a través de programas y normas formales de auditoría<sup>9</sup>.

**Tabla 3.** Porcentaje de conciencia interna

<b>Criterio B</b>	<b>Si</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
B.a) Gestión circular, cultura y control continuo.	16	0	36
B.b) Formación especial para los trabajadores sobre cuestiones medioambientales y economías circulares.	4	0	4
B.c) Inclusión de los factores medioambientales en el sistema de evaluación interna del rendimiento.	8	0	4
B.d) Programa de auditoría medioambiental.	16	4	8
<b>TOTAL</b>	<b>44</b>	<b>4</b>	<b>52</b>

Dentro de este contexto, la compañía registra y contabiliza actividades orientadas a reducir el consumo de materia prima, agua, energía, gas y gasolina, con el objetivo de implementar procesos de mejora continua que estén vinculados a la reducción de costos económicos y ambientales. Estos análisis han dado lugar a cambios en los procesos de ingeniería, como la sustitución de calderas, lo cual permite optimizar el uso de los recursos disponibles.

Como parte de las diversas herramientas para la medición de la circularidad, se plantea un segundo cuestionario, que posee como eje central, el factor de conciencia interna. En este sentido, se exploran aspectos como la visión de la organización sobre la circularidad y las diversas estrategias organizacionales implementadas para lograr resultados en este ámbito. Con esto se busca la identificación de componentes ambientales, tanto en los trabajadores como en las evaluaciones internas relacionadas con este tema.

Se destaca que la empresa en estudio no cuenta con un sistema de gestión ambiental que desempeñe el papel de concienciación ambiental de la organización. No obstante, la empresa ha implementado estrategias enmarcadas en el programa de gestión de la calidad y compromiso con el mejoramiento continuo, para reducir sus impactos en los recursos naturales, como el agua, el aire y el suelo. Asimismo, se ha trabajado en el mejoramiento de la conciencia medioambiental en todos los colaboradores y empleados.

La Tabla 4 presenta preguntas sobre los modelos comerciales de economía circular y sus beneficios; el intercambio de información ambiental a través de productos, conocimientos de economía circular de los proveedores<sup>9</sup>.



**Tabla 4.** Porcentaje de conciencia exterior

<b>Criterio D</b>	<b>Si</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
D.a) Sensibilización de los clientes.	17	0	33
D.b) Etiquetado conjunto de productos.	0	0	17
D.c) Sensibilización de los proveedores.	33	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>50</b>	<b>0</b>	<b>50</b>

En el marco del análisis de la conciencia exterior, en el contexto de la economía circular, se busca determinar la perspectiva ambiental de los proveedores y clientes de la organización, así que, para analizar el nivel de sensibilización de los clientes, la empresa realiza encuestas que incluyen preguntas específicas relacionadas con la percepción ambiental.

Es relevante destacar que la empresa tiene una tendencia a buscar proveedores que cuentan con certificaciones ambientales y de calidad. Esta estrategia beneficia los proyectos futuros de la organización en cuanto a la certificación en normas ambientales, ya que, al establecer alianzas con proveedores que cumplen con estándares ambientales reconocidos, la empresa puede fortalecer su posición en términos de sostenibilidad y promover prácticas circulares.

Sin embargo, es importante señalar que la organización carece de una estrategia relacionada con el etiquetado de sus productos, en cuanto a los beneficios ambientales que estos pueden ofrecer a los clientes. Y aunque se han implementado acciones para reducir el impacto ambiental en la producción y se han buscado proveedores con certificaciones ambientales, no se han logrado comunicar de manera efectiva estos aspectos ambientales a los consumidores. Este aspecto representa una oportunidad para la empresa, pues el etiquetado y la comunicación de los beneficios ambientales pueden generar mayor conciencia y atractivo para los consumidores interesados en adquirir productos más sostenibles.

La Tabla 5 mide el apoyo brindado por las empresas, los proveedores y los clientes a la organización evaluada. Las preguntas cubren aspectos de la adquisición circular, para mejorar los materiales, asegurar los recursos, evaluar a los proveedores, la asociación con empresas o instituciones educativas que comparten la responsabilidad del uso de los materiales y productos, la reutilización y la compartición de energía y agua dentro de la organización<sup>9</sup>.

**Tabla 5.** Porcentaje de apoyo a la cadena de valor

<b>Criterio E</b>	<b>Si</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
E.a) Selección de proveedores con criterios medioambientales.	39	0	11
E.b) Cooperar con otras empresas para establecer cadenas eco industriales.	11	0	17
E.c) Reutilización de la energía y/o agua en toda la cadena de valor.	11	0	11
<b>TOTAL</b>	<b>61</b>	<b>0</b>	<b>39</b>

En el factor denominado “Porcentaje de apoyo a la cadena de valor” se evalúan diversos componentes relacionados con los proveedores y su relación con el ambiente, para ello se consideran aspectos como las contrataciones sostenibles o circulares, con el objetivo de mejorar la calidad de las materias primas, los productos con procesos de reciclaje o remanufactura, y una gestión adecuada de los residuos. Además, este componente también evalúa las redes de colaboración entre empresas del mismo sector o sus filiales, así como la participación de las instituciones educativas. También analiza la generación y uso de energía y obtención del agua por parte de la organización en estudio.

En este sentido, la empresa muestra un fuerte compromiso con el seguimiento de temas medioambientales en relación con sus proveedores, como ya se mencionó, lo cual se considera un aspecto positivo en términos de circularidad. Asimismo, la compañía fomenta la investigación y colaboración con universidades y centros de formación para el trabajo, lo cual contribuye al desarrollo de prácticas más sostenibles.

Sin embargo, es importante destacar que en lo que respecta a la generación de energía y la obtención de agua, la organización no lleva a cabo procesos internos para su producción. Este aspecto puede tener un impacto negativo en términos de circularidad, debido a que depende de fuentes externas para suplir dichas necesidades.

La Tabla 6 agrupa el cuestionario sobre la recuperación de productos; la evitación de la variabilidad de la calidad posterior al uso, para mejorar la posibilidad de renovación; la refabricación o reciclaje, la reutilización, restauración y remanufactura; la disponibilidad de piezas de repuesto; el uso de materiales reciclados para la producción; reciclaje de chatarra, residuos y productos recuperados; la transformación de productos en servicios; la adición de funcionalidades o actualización; y el uso alternativo de componentes y materiales no aptos para el uso original, para evitar que sean vertidos en las fuentes hídricas<sup>9</sup>.



**Tabla 6.** Porcentaje de prácticas externas para la longevidad

<b>Criterio F</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
F.a) Retirar los productos de los consumidores al final de su vida útil.	10	0	5
F.c) Reutilización de productos.	5	0	5
F.d) Reacondicionamiento de productos (es decir, devolverlos a un buen estado de funcionamiento, sustituyendo o reparando los principales componentes defectuosos).	0	0	14
F.e) Remanufactura de productos.	5	0	10
F.f) Uso de materiales reciclados.	0	0	10
F.g) Reciclado de chatarra.	0	0	5
F.h) Reciclaje de productos recuperados tras el fin de su vida funcional.	0	0	5
F.i) Reciclaje de productos recuperados tras su uso.	0	0	5
F.j) Adopción de una estrategia de marketing basada en el arrendamiento o los servicios.	0	0	10
F.k) ¿Adoptar una estrategia de actualización del mercado?	0	0	10
F.l) Uso en cascada (es decir, múltiples usos o aplicaciones) de componentes y materiales una vez que sus propiedades se pierden y ya no pueden reciclarse.	5	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>24</b>	<b>0</b>	<b>76</b>

En cuanto a las prácticas externas relacionadas con la longevidad de los productos, se evalúa la posibilidad de extender la vida útil de los mismos, lo cual es fundamental en la estrategia de las “R” que se maneja en el modelo de economía circular, a partir de la cadena de valor que presenta modelos de innovación para mejorar el uso eficiente de recursos mediante diversas estrategias, como el reciclaje, el reúso, el rediseño y los modelos de simbiosis entre dos o más empresas, como el de compartir infraestructura o el intercambio de subproductos<sup>13</sup>.

Como resultado del análisis realizado, se observa que la organización tiene un número limitado de estrategias relacionadas con la longevidad de los productos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esto puede deberse a la naturaleza de la empresa, ya que posee clientes a nivel internacional y sus productos son consumidos, lo que dificulta la implementación de estrategias de reutilización y remanufactura. En este contexto, las oportunidades para aplicar estas estrategias se centran, principalmente, en los empaques de los productos; pero, dado que los clientes se encuentran lejos geográficamente, el retorno de los empaques es un desafío logístico y económico.

**Tabla 7.** Porcentaje de aumento del mercado ecológico

<b>Criterio G</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
G.a) Dirigirse a los segmentos "verdes" del mercado.	33	0	11
G.b) Incentivos.	11	0	44
TOTAL	44	0	56

En relación con la Tabla 7, "Porcentaje de aumento del mercado ecológico", se busca que todos los actores involucrados en el ciclo de vida útil del producto consideren los aspectos medioambientales y establezcan incentivos para fomentar prácticas ambientales con dichos productos.

Como fortaleza de la compañía, se destaca su atención a las necesidades del mercado ecológico, pues la materia prima utilizada es un recurso natural renovable, y la organización tiene plena conciencia de la importancia de la conservación de la flora y fauna de la cual proviene la materia prima. Sin embargo, dentro de este mercado ecológico, también se evalúan las estrategias de recuperación, reutilización, reacondicionamiento y remanufactura de los productos y, una vez más, se evidencia la falta de prácticas orientadas a conceder incentivos de precios o servicios ofrecidos por la organización.

Es importante considerar que, en el contexto del aumento del mercado ecológico, el enfoque en la conservación de la especie de materia prima es un aspecto positivo. No obstante, persiste la necesidad de desarrollar y aplicar prácticas más sólidas relacionadas con los incentivos económicos o los beneficios adicionales que promuevan la recuperación, la reutilización, el reacondicionamiento y la remanufactura de los productos. Estas estrategias pueden generar un mayor valor tanto para la organización como para el mercado ecológico, lo cual se alinea con los principios de la economía circular y fomentan la sostenibilidad.

En la Tabla 8 se presentan los resultados con respecto a los cambios tecnológicos que son fundamentales para reducir la contaminación en la producción y que se enfocan en estrategias de producción más limpia. Esto implica revisar las inversiones en infraestructura, maquinaria y equipos, así como la investigación y desarrollo en colaboración con centros de investigación de diversos ámbitos.



**Tabla 8.** Porcentaje de desarrollo tecnológico

<b>Criterio H</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
H.a) Cooperación interfuncional para mejoras medioambientales.	43	0	57

Como resultado de esta encuesta, se determina que la empresa no está realizando inversiones significativas en infraestructura ni en innovación para mejorar su proceso productivo, y esto implica que los niveles de contaminación no se hayan reducido a lo largo del tiempo. Sin embargo, es importante destacar que la compañía tiene como proyectos a mediano plazo, la consecución de capital para la actualización de sus tecnologías y la búsqueda de redes estratégicas para la investigación y el desarrollo. Esto demuestra su reconocimiento de las debilidades en el área ambiental y su intención de utilizar esta herramienta como un instrumento de mejora. En cuanto a la última encuesta (Tabla 9), relacionada con el desarrollo legislativo, se busca evaluar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. En este aspecto, la organización muestra fortaleza, ya que cuenta con asesoría en el diseño y cumplimiento de los requisitos legales ambientales; además, al estar regulada por las autoridades ambientales de la ciudad, refleja un trabajo colaborativo y de cooperación entre el gobierno y la empresa<sup>9</sup>.

**Tabla 9.** Porcentaje de desarrollo legislativo

<b>Criterio I</b>	<b>Sí</b>	<b>Parcial</b>	<b>No</b>
I.a) Legislación y políticas.	75	0	25

La empresa demuestra un compromiso sólido con el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes. La asesoría especializada en el diseño y el cumplimiento de los requisitos legales es un indicador positivo de su enfoque en la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Al colaborar estrechamente con las autoridades ambientales, se establece una relación de trabajo conjunta que promueve un ambiente regulatorio favorable y una mayor protección del medio ambiente.

De acuerdo con los resultados se cuantifica el aporte de cada criterio sobre el nivel de circularidad, sumando cumplimiento o no de ese criterio como se presenta en la Tabla 10.

A pesar de que la empresa se pondera en un nivel 3.5 de circularidad, no puede ser considerada de esta forma, ya que el aporte hacia este valor no corresponde fundamentalmente a la conciencia interna y las acciones de diseño, producción, distribución y envasado que buscan la utilidad y eficiencia de los recursos en las prácticas internas. Por lo anterior, la empresa se clasifica como una organización con enfoque descendente, lo que corresponde a empresas que, de manera inadvertida, ya están implementando algunas prácticas internas de economía circular relacionadas con el consumo, la utilización y la eficiencia de sus recursos. Esto quiere decir que, como empresa, desconocen la economía circular, pero que se han dado cuenta de que pueden obtener beneficios económicos con la adopción de ciertas prácticas de la economía circular.

**Tabla 10.** Nivel de circularidad

<b>Criterios</b>	<b>Resultados</b>
A	1
B	0
C = A+B	1
D	0,5
E	1
F	0
G	0
H	0
I	1
Nivel de circularidad	3,5

Dichas adopciones se han dado en la empresa como producto de los requerimientos legales y de exigencias requeridas por parte de la cadena de valor asociada con la empresa.

## 4. Conclusiones

Como conclusión de los resultados obtenidos es importante destacar que la organización tiene aspecto positivo el enfoque en el diseño y la producción, que se ha desarrollado desde la identificación de sus aspectos e impactos ambientales



a lo largo de todo el ciclo de vida del producto, y esto ha permitido la detección de oportunidades para mejorar la eficiencia de los recursos, la reducción de sus emisiones y la gestión adecuada de los residuos.

Con relación a las practicas internas, dentro de las estrategias organizacionales se encuentran la reducción de materias primas, consumo de energía, agua, gasolina y gas, lo cual demuestra un compromiso hacia la mejora continua, aunque, como se evidenció en la encuesta, la compañía no tiene sistema de gestión ambiental y esto dificulta el enfoque sostenible que es necesario para la circularidad.

En cuanto a la conciencia interna, se hace necesario sensibilizar a todos los colaboradores y a todas las áreas de la organización, para que promuevan los temas ambientales en sus actividades; asimismo, en la conciencia externa, es relevante que se le dé prioridad a los proveedores que tengn certificaciones ambientales y de calidad, así como estar atentos a la percepción ambiental de los clientes, ya que, en este aspecto, no se evidencian estrategias para la generación de incentivos relacionados con la circularidad ni prácticas de recuperación, reutilización, reacondicionamiento y remanufactura en sus empaques.

En la cadena de valor falta inversión en infraestructura y en la tecnología necesaria para disminuir la contaminación generada. Y con relación al mercado ecológico se observa la falta de prácticas de incentivos de precios o servicios relacionados con la circularidad.

Finalmente, en cuanto al desarrollo legislativo, se destaca el cumplimiento de la legislación ambiental y el trabajo colaborativo con las autoridades ambientales locales. Se evidencia que la participación en los mercados internacionales representa una aceleración en la creación y ejecución de programas y acciones relacionados con la economía circular; sin embargo, esto no garantizado un cambio cultural y social que permita la conciencia hacia el desarrollo y las prácticas sostenibles.

## Referencias

1. Silvério A, Ferreira J, Odete P, Dabic M. How does circular economy work in industry?
2. de Melo TAC, de Oliveira MA, de Sousa SRG, Vieira RK, Amaral TS. Circular Economy Public Policies: A Systematic Literature Review. *Procedia Comput Sci.* 2022;204:652–62. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.08.079>.

3. Maher R, Yarnold J, Pushpamali NNC. Circular economy 4 business: A program and framework for small-to-medium enterprises (SMEs) with three case studies. *J Clean Prod.* 2023;412(March 2022):1–13. [https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2023.137114](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137114).
4. Alvarado-bawab MB, Villa S. Industrial perspective regarding circular economy activities in Atlántico-Colombia. *J Econ agro-alimentare Food Econ.* 2023;25(1):191–217. [https://doi.org/ 10.3280/ecag2023oa14669](https://doi.org/10.3280/ecag2023oa14669).
5. Park JY, Chertow MR. Establishing and testing the 'reuse potential' indicator for managing wastes as resources. *J Environ Manage.* 2014;137:45–53. [https://doi.org/ 10.1016/j.jenvman.2013.11.053](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.053).
6. Di Maio F, Rem PC. A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling. *J Environ Prot (Irvine Calif).* 2015;6(10):1095–104. [https://doi.org/ 10.4236/jep.2015.610096](https://doi.org/10.4236/jep.2015.610096).
7. Ellen Macarthur Foundation. Completing the picture: How the circular economy tackles climate change. 2019.
8. Li RH, Su CH. Evaluation of the circular economy development level of Chinese chemical enterprises. *Procedia Environ Sci.* 2012;13(2011):1595–601. [https://doi.org/ 10.1016/j.proenv.2012.01.151](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.151).
9. Garza-Reyes JA, Salomé Valls A, Nadeem SP, Anosike A, Kumar V. A circularity measurement toolkit for manufacturing SMEs. *Int J Prod Res.* 2019;57(23):7319–43. [https://doi.org/ 10.1080/00207543.2018.1559961](https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1559961).
10. Bjørnset MM, Skaar C, Fet AM, Schulte KØ. Circular economy in manufacturing companies: A review of case study literature. *J Clean Prod.* 2021;294. [https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2021.126268](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126268).
11. Sharma M, Joshi S, Prasad M, Bartwal S. Overcoming barriers to circular economy implementation in the oil & gas industry: Environmental and social implications. *J Clean Prod.* 2023;391(March):136133. [https://doi.org/ 10.1016/j.jclepro.2023.136133](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136133).
12. Hernandez Sampieri R. Metodología de la Investigación. 6th ed. Bogotá; 2014.
13. Van Hoof B, Núñez G, De Miguel C. Metodología para la evaluación de avances en la economía circular en los sectores productivos de América Latina y el Caribe. *Cepal.* 2022;229(1):1–68. Disponible en: [www.cepal.org/apps](http://www.cepal.org/apps).



# Gestión de la jerarquía del *Lean Manufacturing* en función de la trazabilidad de las funciones: un caso en pymes de la región Caribe de Colombia

Valentina Ramírez Hernández\*\*

Gabriela Cristina Morales Barón\*

Vanessa Estela Hoyos Díaz\*

Alejandra Pérez Zapata\*

Santiago de Jesús Sotomayor Brun\*

Edgar de Jesús Galvis López\*

Elian David Martínez Penagos\*

---

\* Universidad Pontificia Bolivariana, Programa de Ingeniería Industrial.

\*\* Autor para correspondencia: [valentina.ramirez@upb.edu.co](mailto:valentina.ramirez@upb.edu.co)

## Resumen

La correcta visión sistémica de los sistemas productivos ha impedido que sean trabajados de forma sinérgica, holística y simultánea, por lo que el efecto dominó de sus acciones ha conducido al deterioro de las funciones productivas a través del desperdicio, lo cual ha propiciado el aumento de sus costes logísticos y de producción. Por ello, la gestión organizacional necesita realizar modificaciones en la producción, introduciendo acciones simultáneas que reduzcan los impactos negativos al medio ambiente, especialmente en el desarrollo del producto y del proceso, hasta alcanzar un nivel de madurez en la relación costo-beneficio, que también implica un factor social. El problema radica en que se ha encontrado que muchas empresas han tenido dificultades estructurales frente a la aplicación metodológica de las técnicas, debido a que la función epistemopraxeológica y la aplicación de sus componentes es errónea y, en ocasiones, inexistente, lo que propicia que la implementación de prácticas y propósitos de la economía circular que opera bajo el contexto de la manufactura sostenible frene el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible. Se considera, entonces, un sistema de producción dentro de la gestión de todo el ciclo de vida de un producto y un proceso que cumpla con el comportamiento natural y cíclico de los procesos y productos, de tal modo que promueva las ecoinnovaciones en los negocios, lo cual incluye la diversificación de las líneas de producción cuando se reprocesan sus residuos.

A este fenómeno se le suman las exigencias de las diferentes leyes gubernamentales y de normalización, que llegan de manera sorprendente y disruptiva en un contexto en el que el trabajo y la adaptación de estos conceptos, de modo proactiva a un contexto social, cultural y axiológico, no estaba muy avanzado ni científica, técnica y tecnológicamente. Es así como, de manera premeditada, planificada y estudiada, se ha pretendido conocer cómo es el contexto, la comprensión y la forma de aplicar algunos conceptos industriales claves en una pequeña muestra industrial del contexto caribeño colombiano.

**Palabras clave:** manufactura Lean, producción más limpia, recursos humanos verdes, control estadístico de calidad, gestión jerárquica.



## Abstract

The correct systemic vision of production systems has prevented them from being worked in a synergistic, holistic and simultaneous way, so the domino effect of their actions leads to the deterioration of production functions through waste and with it, the increase in its logistics and production costs. Within this purpose, organizational management needs to make alterations in production by introducing simultaneous actions that reduce negative impacts on the environment, especially in the development of the product and the process, until reaching a level of maturity in the cost-benefit ratio, which It also involves a social factor. The issue lies in the fact that it has been found that many companies have had structural difficulties in the face of the methodological application of techniques, due to the fact that the epistemopraxeological function and application of its components is wrong and sometimes non-existent, so the implementation of practices and purposes of the Circular Economy that operates under the context of Sustainable Manufacturing, is slowing down in the fulfillment of the Sustainable Development objectives. A production system is then considered within the management of the entire product life cycle and a process, complying with the natural and cyclical behavior of processes and products, which results in eco-innovations in business, which includes diversification. of production lines when their waste is reprocessed.

To this phenomenon is added the demands of different government laws and Standardization, which arrive surprisingly and disruptively in a context where work and adaptation of these concepts in a proactive way to a social, cultural, axiological context was not very advanced, scientific, technical and technological. This is how, in a premeditated, planned and studied way, it has been tried to know how the context is, understanding and way of applying some key industrial concepts in a small industrial sample of the Colombian Caribbean context.

**Keywords:** Lean Manufacturing, Cleaner Production, Green Human Resources, Statistical Control Quality, Hierarchy Management.

## I. Introducción

La visión sistémica de los sistemas productivos promueve patrones de producción, productos, servicios y consumo más funcionales, integrales y flexibles que los tradicionales. Sin embargo, el desarrollo de estas funciones requiere de una estructura operativa básica en la que el concepto *Lean Manufacturing* es de vital importancia. Este concepto tiene su origen en la fábrica japonesa TOYOTA y se define como un conjunto de técnicas desarrolladas con el propósito de optimizar la productividad de un sistema de manufactura, por medio de la mitigación del desperdicio de los recursos y las acciones que no agregan valor, basado en un esquema cíclico de mejora continua y en el respeto por los empleados<sup>1</sup>, lo cual se traduce en el aumento de la productividad y competitividad de la empresa, pues se reducen tiempos, se controlan los procesos, se mejoran los puestos de trabajo y se optimiza la cadena de suministro<sup>2,3</sup>.

Yadav *et al.*<sup>1</sup> visualizaron todos los *drivers* del *Lean Manufacturing* luego de un estudio en pequeñas empresas de países emergentes, en los que evaluaron la aplicación de sus principales herramientas y la relación jerárquica entre ellas, y esto reveló que *Shop Floor Management*, o la gestión de la planta, era el corazón de toda la articulación y sincronización de las demás herramientas, lo que conlleva el cumplimiento de un comportamiento estratégico y dependiente entre dichos conductores y supone una jerarquía entre sus conceptos, es decir, cualquier herramienta/concepto no puede ser aplicado sin antes descomponer algunos de sus conceptos. De ahí se deriva entonces la posterior y simultánea aplicación de la estrategia de fabricación, la gestión de la calidad, el proceso de fabricación, la gestión de proveedores y clientes, y la gestión de la plantilla; siendo la gestión de la calidad la que tiene relación simultánea con todos ellos y la que retroalimenta directamente al *Shop Floor*. La gestión es la encargada de cerrar el ciclo en este pensamiento sistémico.

Por lo tanto, es necesario revisar el concepto de "gestión de calidad", así como el de "producción más limpia", para encontrar que entre ellos resulta un punto convergente: la eliminación de residuos, que incluye a los que son fuentes de contaminación, puesto que los productos con mala calidad también son un desperdicio. De esta manera, se visualiza la importancia de comenzar con la estandarización de los procesos, los cuales deben ser documentados, medidos y controlados mediante herramientas estadísticas de calidad, que den certeza de comportamiento y cumplimiento de estándares que son la base de la efectividad y trazabilidad de los procesos.



El "control de calidad" se define, entonces, como "una estrategia de gestión, que está a cargo de los altos directivos, donde se llevan a cabo mejoras en la calidad de los productos a través de un plan estratégico"<sup>4</sup>. Según Ishikawa, el término corresponde a la inclusión de toda la organización hacia un mismo objetivo, "que es desarrollar, diseñar, fabricar y mantener un producto de calidad que sea el más económico, útil y satisfactorio para el consumidor"<sup>4</sup>. Esto termina siendo conocimiento y control del costo, beneficio y satisfacción, para lo cual ya se reporta la importancia de esta actividad con un plan estratégico y la mejora continua de la que surge la función del concepto de la metodología DMAIC, que sería la integración y el control de *Lean Six Sigma*, mediante el cual se eliminan actividades que no agregan valor en los procesos, como desperdicios, tiempos de ciclo y variaciones en el producto<sup>5,6</sup>.

Por su parte, la "producción más limpia" se define como "la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada aplicada a procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia general y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente, brindando un buen servicio a las partes interesadas"<sup>7</sup>. Esto le da, entonces, la figura de estrategia de competitividad, ya que a través de su implementación se fortalece la posición competitiva de la empresa, mediante la diferenciación de productos, precios y servicios, y como efecto de un buen control de costos por la gestión y el reprocesamiento de sus residuos, lo cual trae consigo un aumento en la eficiencia de los procesos y, a su vez, aumenta el valor percibido por los clientes<sup>8</sup>, cifra que cumpliría con uno de los objetivos de la estrategia de manufactura, en la que desde el punto de vista del plan estratégico, desglosado en su plan táctico y operativo, la programación de la producción facilita el control de inventarios con la asignación óptima de materiales en cantidades y tiempos de suministro, con base en las demandas (bajo el sistema Pull), la reducción del tiempo de ciclo (a través del diseño y evaluación de trabajos, bajo un esquema de configuración rápido y equilibrado, que coordina con el *Lead Time* de los proveedores), e incluyendo la trazabilidad de la calidad, lo cual es significativo en una cadena de valor. Esto supone entonces una taxonomía del sistema de producción justo a tiempo, siendo esta clasificación la más madura y exigente, según Miltenburg, en su libro *Manufacturing Strategy*<sup>9</sup>.

Sin embargo, todas estas acciones deben realizarse por medio de los empleados o la *Workforce Management*, que es un principio de la filosofía Lean, por lo que se debió revisar el concepto de "*Green Human Resources*", como un "conjunto de prácticas enfocadas a ser que tienen como objetivo desarrollar y mantener las habilidades, motivaciones y oportunidades de la fuerza laboral que contribuyen a la sostenibilidad económica y ambiental de una organización"<sup>4</sup>. Este concepto apoya los cambios a largo plazo en la mentalidad y el comportamiento de los

empleados, puesto que es un requisito previo para los cambios en el entorno de toda la organización<sup>10</sup>.

Para ello, es importante considerar el concepto de "cultura ética organizacional", que desarrolla la responsabilidad social de las empresas, es decir, "el logro de una sociedad mejor y un medio ambiente más limpio. Esta necesidad de artefactos, mitos, valores e ideologías contienen en su núcleo una reflexión sobre los comportamientos correctos e incorrectos dentro y alrededor de la organización, que depende del liderazgo de la alta dirección y está respaldada, formal e informalmente, por la estrategia y estructura de la organización"<sup>11</sup>, que otorga y proporciona un "valor agregado" a proyectos empresariales y competitivos, para alcanzar el desempeño de la responsabilidad social organizacional (RSO), que corresponde al reconocimiento de la organización como grupo social inserto en la sociedad de la que depende<sup>12</sup>.

La integración de los factores anteriores trae, como efecto y beneficio final, el mejoramiento de la imagen institucional, la renovación del portafolio de productos, el aumento de la productividad, el acceso a mercados externos, el mejoramiento de las relaciones con organismos gubernamentales, grupos comunitarios y ambientalistas, que son acciones que puede medirse por medio del Cuadro de Mando Integral (BSC) que es la base para la implementación de las normas ISO 9001, ISO 14001 e ISO 26000, correspondientes a un enfoque empresarial proactivo y multidisciplinario<sup>13,14</sup>.

Desde este punto de vista convergente, en función del desarrollo de los tres ejes articuladores de la sustentabilidad en manufactura (social, ambiental y financiero sobre el rendimiento de las funciones de producción), se han presentado algunos casos en empresas monterianas que han solicitado ayuda, así como en empresas manufactureras indagadas, las cuales se han caracterizado por el difícil proceso de normalización, por la dificultad en los procesos de estandarización que ha dejado en evidencia las fallas en la aplicación de la ingeniería de métodos y de los procesos contaminantes y poco productivos.

De ahí que continúen siendo procesos con poca productividad, con desperdicios y contaminación, y no podrán avanzar en el cumplimiento de su visión ni su misión, ni con algunas normatividades legales; pero sí tendrán serias dificultades al momento de concretar las exportaciones con diferentes clientes extranjeros.



Por todo lo anterior, se plantea la pregunta: ¿cuál sistema de manufactura implementar en la ciudad de Montería para lograr procesos productivos que a la vez sean sustentables? De acuerdo con esta cuestión, el principal objetivo de este artículo es conocer las necesidades y los pasos a seguir dentro de un sistema de producción, mediante la jerarquización de las categorías de las prácticas y las herramientas *Lean Manufacturing* que ayudan a dicha gestión, de tal manera que se puedan adquirir unas prácticas genéricas sustentables dentro de las empresas.

## 2. Métodos

Para esta indagación, se utilizó la técnica de triangulación, dirigida, en este caso, a diferentes autores y enfoques del tema, para analizar el punto de vista y el pensamiento desde diferentes ángulos y sobre diferentes conceptos de la investigación, de tal modo que las diferentes opiniones den como resultado unas conclusiones más globales del tema según las convergencias entre ellas<sup>15</sup>.

También se utilizaron diferentes postulados de la teoría del estudio de caso, pues ofrecía la posibilidad de identificar relaciones generales que no están explícitas dentro de la teoría, al explorar los diferentes enfoques que tienen los temas de investigación; esto con el objetivo de aclarar dudas y formular hipótesis basadas en la información hallada<sup>16</sup>. Todo lo cual generará conocimiento aplicable en la práctica y enfocado en la resolución de problemas específicos, es decir, en la formulación de una ruta de prácticas que esclarezcan dichos procedimientos. A continuación, se explicarán las tres fases en las que se desarrollará la investigación.

### 2.1 Revisión bibliográfica y recolección de datos cualitativos

Se realizó una búsqueda de diferentes fuentes, utilizando palabras clave en bases de datos, como SCOPUS, Science Direct y otras, con el fin de conocer el desarrollo, el avance y la integración de la temática; es decir, la convergencia desde el punto de vista del *Lean Manufacturing*, que proporciona una síntesis sobre el estado actual del tema. A partir de aquí se realizaron las primeras categorizaciones, mediante la realización de una matriz del estado del arte<sup>17,18</sup>.

## **2.2 Identificación de variables de estudio; diseño y aplicación de un instrumento de diagnóstico**

Se compararon los diversos puntos de vista de los autores y se identificaron las convergencias y divergencias entre sus características por medio de una matriz marco teórica, en la que se determinaron diferentes variables a través de una codificación axial<sup>19</sup>, lo cual también permitió construir un marco teórico a partir de lo encontrado en dichas fuentes. Se diseñó, además, una encuesta de aplicación cualitativa que cumplía con un porcentaje de confiabilidad del 90% y, por ende, con la validez ante el juicio de los expertos.

## **2.3 Análisis cualitativo de datos**

Los resultados fueron tabulados en una Matriz DOFA, que facilitó el análisis, la discusión y la interpretación del conocimiento tácito obtenido por los investigadores y por las unidades investigadas, de modo que la descripción de las características caracterizó las relaciones entre sus variables. Finalmente, se concluyó con la propuesta de una ruta de pasos a seguir para asegurar la convergencia de los procedimientos y, con ello, poder establecer una buena trazabilidad de las funciones.

# **3. Resultados y discusiones**

## **3.1 En cuanto al descubrimiento de variables teóricas**

Por medio de la revisión bibliográfica se analizaron 47 artículos, los cuales contenían las palabras clave a investigar y las relaciones que presentaban sus convergencias, de las cuales se retomaron elementos. Posteriormente, con la elaboración de la matriz del marco teórico se encontraron las principales variables de estudio: prácticas clásicas y verdes de gestión del talento humano, factores psicológicos asociados a un puesto de trabajo versus la adaptación de prácticas sustentables, sistemas de gestión, competencias y prácticas laborales ambientales, residuos, costes, ciclo de vida, cultura, consumo, riesgo ambiental, requisitos legales, impactos ambientales, sistemas de gestión, herramientas y técnicas de calidad, estandarización,



indicadores e integración. Con dichas variables se formularon preguntas mediante tres encuestas en las que se evaluó la convergencia del *Lean Manufacturing* con la producción más limpia, el control estadístico de la calidad y los recursos humanos verdes. Cada una de las encuestas tenía, aproximadamente, 45 preguntas.

### **3.2 Respeto a las características de las empresas participantes y el análisis de sus respuestas**

Las empresas seleccionadas fueron elegidas de acuerdo con criterios de selección según sus características en los procesos productivos, eficiencia en el mercado, producción mediada por tecnología (como con equipos computarizados), cumplimiento de normas de seguridad para promover el trabajo sin riesgo de accidentes y la garantía de la integridad física, mental y de salud de sus colaboradores, las cuales también son consideradas como empresas con responsabilidad ambiental y, por lo tanto, debían contar con, al menos, las certificaciones ISO 9001, ISO 14001, ISO 45000 o ISO 26000, la Certificación Kosher; es decir, empresas que aceptaron colaborar con la realización del estudio de diagnóstico.

A continuación, se indican las principales características de las once empresas participantes en el estudio se encuentran:

- Producción de arroz con cooperativa de agricultores basada en el logro de efectividad y gestión tecnológica para el sector.
- Empresa de alimentos lácteos.
- Producción de bebidas azucaradas a base de ingredientes naturales, bebidas azucaradas carbonatadas y agua.
- Producción de salsas, aderezos, frutos secos, condimentos, snacks y mermeladas.
- Producción y comercialización de carnes y exportación de ganado en pie.
- Empresa de logística y distribución de productos alimenticios.
- Producción de alimentos balanceados para animales.
- Transformación de madera.
- Producción de repuestos para motocicletas.
- Fabricación de fertilizantes y compuestos nitrogenados inorgánicos.

A continuación, en la Tabla 1, se muestra la tabulación de los datos a través de la matriz DOFA.

**Tabla 1.** Tabulación de datos en la matriz DOFA

<b>Fortalezas</b>		<b>Debilidades</b>
F.1 Estudios de tiempos.		D.1 No hay evaluación de proveedores.
F.2 Mapa de procesos de la organización.		D.2 No hay sistema de alarmas para errores.
F.3 Personal de limpieza y segregación de residuos.		D.3 No hay indicadores para el desperdicio en recursos.
F.4 Algunas mediciones.		D.4 No hay seguimiento al ciclo de vida de productos.
F.5 Algunas certificaciones en algunas empresas estudiadas.		D.5 No hay implementación de Lean Six Sigma.
<b>Oportunidades</b>	<b>Estrategia FO</b>	<b>Estrategias DO</b>
O.1 Hay voluntad de certificación.		
O.2 Formalizar diferentes medidas al sistema de producción.		
O.3 Esquemas básicos de administración de inventarios.		
O.4 Esquemas básicos de planes de mantenimiento.		
O.5 Formalización de documentación para estandarización.		
	Documentación del sistema de producción en función de un diagnóstico inicial de todas sus palancas de producción, incluyendo la medición del desperdicio. Mejorar los planes hechos según la normatividad.	Planear la trazabilidad del sistema de producción y logístico, con la finalidad de tomar medidas y planes de acción a seguir desde la claridad de la fase estratégica que se determine para cada empresa. Poner de manifiesto aquellas medidas y acciones que faciliten un control de calidad con Lean Six Sigma.
<b>Amenazas</b>	<b>Estrategias AF</b>	<b>Estrategias AD</b>
A.1 Faltan mediciones del sistema que son fundamentales.		
A.2 No hay presentación de un rendimiento claro del sistema.		
A.3 No hay claridad sobre la trazabilidad completa del producto y proceso.		
A.4 No hay confiabilidad en los datos tomados.		
A.5 No cumplen con los estándares de fabricación mundial.		
	En vista de que son concientes de algunas fallas, programar capacitaciones en cuanto a la normalización de las palancas de fabricación en la disminución de desperdicio en todas las palancas de producción, planes de documentación, medición y cambio de la cultura organizacional en función del trabajo y difusión del uso de herramientas Lean Manufacturing.	Implementar sistemas informáticos de trazabilidad, ERP, MRP, que permitan sincronizar la cadena logística de cada sistema, haya registro confiable de datos, para su posterior análisis, diagnóstico y toma de decisiones de mejora de forma mas puntual. Hacer un benchmarking sectorial, para atinar la gestión tecnológica a las necesidades y tendencias del sector en el que se desempeñen.



### 3.3 Métodos de interpretación de datos

Respecto a la interpretación de los datos cualitativos, se realizan tres análisis principales que se detallan en los siguientes ítems.

#### 3.3.1 Convergencia entre *Lean Manufacturing* y producción más limpia

Existe una pequeña relación entre las prácticas de producción más limpia y el *Lean Manufacturing*, aunque el desarrollo de sus actividades reveló una gran oportunidad de mejora con los beneficios que proporciona la convergencia de dichas prácticas, con el fin de lograr mejoras en los costos operativos mediante la reducción de los desperdicios causados por el sistema productivo que también causa contaminación ambiental; sin embargo, esta cifra aún no había sido obtenida, por lo que se expresó interés en el inicio de la implementación de dicha convergencia de modo que se pudieran eliminar algunos cuellos de botella, a la vez que aumentar la satisfacción del cliente cuando el producto es entregado en el tiempo y el lugar requerido.

#### 3.3.2 Convergencia entre *Lean Manufacturing* y control estadístico de calidad

Se evidenció que no existe mucha relación entre los conceptos y las herramientas del *Lean Manufacturing* basado en el control estadístico de calidad, lo que significa que no existen muchas medidas de control de procesos, lo que da indicios de una falta generalizada de estandarización. Por lo tanto, es necesario planificar métodos de enseñanza para realizar la capacitación del personal de ingreso con una permanencia de un año en la empresa; proyectar actividades para la obtención de certificaciones, como ISO 9001, ISO 14001 e ISO 45000; mejorar los métodos de asignación y distribución de recursos para asegurar el abastecimiento de inventarios; consolidar conocimientos sobre los beneficios, en términos de control de procesos; brindar mantenimiento de equipos, implementación de capacitaciones para ampliar el conocimiento del personal y altos ejecutivos respecto a los conceptos de Jidoka y su función dentro del control de calidad que reduzcan los errores intervenidos con las herramientas de control de calidad, para el mejoramiento de las estrategias de planificación, para fortalecer el conocimiento sobre el control visual de procesos y el desperdicio de recursos, para implementar herramientas de evaluación de proveedores con respecto al cumplimiento del suministro de inventarios.

### 3.3.3 Convergencia entre *Lean Manufacturing* y recursos humanos verdes

Se identificó que las empresas investigadas tienen conocimiento en el tema del talento humano y manifiestan tener un compromiso con la sustentabilidad en sus procesos de producción más limpios y basados en la adopción de tecnologías limpias. Las capacitaciones acerca de estos asuntos las realizan dentro y fuera del lugar de trabajo, por lo que se encontró que cuentan con disposiciones legales y políticas durante los procesos de capacitación y en la gestión ambiental, aunque se necesita la Certificación ISO 26000 aplicada a sus procesos. Por lo tanto, la figura de la responsabilidad social empresarial aún no está muy bien implementada y esto impide la realización de actividades sustentables a través de planes de carrera, compensaciones y dotación de personal con estas características.

Por lo anterior, se propone la siguiente ruta de prácticas que respeta la gestión jerárquica del *Lean Manufacturing* y permite la desagregación dependiente de sus funciones, para asegurar de este modo la trazabilidad de una gestión convergente que supone el mismo comportamiento cíclico.

En síntesis, los principales resultados de acuerdo con el estudio de las categorías halladas en las encuestas, frente a la indagación de las variables encontradas, son:

- Aunque hay conciencia sobre la segregación de residuos y la necesidad de acondicionar procesos de producción en torno a una gestión sustentable, no hay medición del sistema de producción, por lo cual se infiere que no solo no conocen muy bien las rentabilidades de sus negocios, sino que no han diagnosticado la situación actual que les indique sus potenciales de mejora. Lo que no se puede medir, no se puede mejorar.
- Hace falta un sistema verídico y confiable sobre la documentación del sistema que conlleve, de forma unánime, a la estandarización de su proceso de producción y, por ende, no es sencillo aplicar un sistema de control de calidad que funcione bajo el esquema de documentación y medición.
- Hubo conciencia sobre la convergencia de temas, como, por ejemplo, la producción más limpia y el *Lean Manufacturing*, pues esta última facilita la gestión de un proceso limpio y con menos desperdicios desde la fuente.
- Se debe implementar un sistema de *Lean Manufacturing* después de la estandarización de los procesos de producción, y en la que el desglose de sus herramientas ayude a organizar el proceso, a disminuir los tiempos de producción y a realizar mediciones del sistema, en pro de la implementación de un control de calidad efectivo.



- No hay cultura organizacional sobre las prácticas sustentables al interior de las empresas indagadas, por lo que los niveles de desperdicio en sus recursos de producción, a lo largo de la cadena productiva, es evidente y se contabilizan dentro de los tiempos y costos de esta, y no precisamente en la agregación de valor. La gerencia del talento humano es poco practicada desde sus seis etapas teóricas, como se aprecia en la Figura 1.

**Figura 1.** Estructura funcional jerárquica que asegura la trazabilidad de los procesos de producción, mediante el desglose de tareas propuestas por el Lean Manufacturing.



## 4. Conclusiones

Lo que se puede concluir de este estudio es que, para lograr un nivel de sustentabilidad en la empresa que involucre sus tres esferas (social, ambiental y financiera), se hace necesario deconstruir etapas progresivas, tal como se muestra en la Figura 1, pues hay prácticas que son fundamentales en la construcción de un sistema de producción que, a su vez, converge con prácticas pertenecientes a otros niveles o conceptos cuya aplicación da por hecho que las anteriores etapas ya han sido superadas. Es ahí cuando se ha encontrado la dificultad, ya que el desglose conceptual que involucra el despliegue de una serie de conceptos es el que no está claro ni presente en los sistemas de producción estudiados para este caso, por lo que su resultado, en cuanto a la gestión, resulta ser deficiente por las dificultades

en los procesos de estandarización, normalización y control de calidad, que son aspectos fundamentales para cualquier sistema de producción. Si esto no se garantiza en primera instancia, no pueden haber procesos con concepciones o resultados sustentables en sus tres esferas.

A partir de este desglose jerárquico de funciones y todo lo que cada concepto involucra en su desarrollo (en el que el *Lean Manufacturing* abarca todas las funciones de producción y, por ende, los factores de sustentabilidad) se implicaría el replanteamiento de dichas funciones básicas, que garantizan las funciones de conceptos más avanzados hasta llegar a ser sustentable, lo que involucra un despliegue de documentaciones, mediciones, procesamiento de datos y convergencia de funciones, lo cual implica tiempo y paciencia. Sin embargo, esto daría como resultado la reducción de costes a lo largo del ciclo de vida, puesto que se prevendrían los fallos de calidad y se maximizaría la productividad, que depende de una buena coordinación obtenida por la implementación de una taxonomía justo a tiempo, cuya base es la eliminación del desperdicio en todos los recursos e incluye actividades como transporte, almacenamiento, retrasos, sobreproducción o incumplimiento en el flujo de trabajo; al igual que la eliminación de los cuellos de botella.

Esta adaptabilidad se da mediante el desarrollo del talento humano, pues, finalmente, como ejecutores de las tareas de manufactura, y que desde el punto de vista de *Green Human Resources* (la cual está orientada al reclutamiento, selección, capacitación, evaluación del desempeño, recompensas, trabajo en equipo, gestión de la cultura y ética organizacional, planes de carrera y gestión del cambio) se incide directamente en la ejecución de las actividades de manufactura con sustentabilidad y calidad, basadas en la estandarización de sus actividades, incluidas las compras verdes y la cooperación con los clientes (prácticas que, luego, son esenciales para la implementación y mantenimiento del sistema de gestión ambiental). Esto apoyaría al mismo tiempo, e inmediatamente, el desarrollo de productos e innovaciones con menores impactos ambientales, sobre todo cuando esto permite la diversificación con la reprocesamiento de sus residuos y la importancia en la constitución de negocios verdes, ampliamente facilitados por la implementación simultánea de la responsabilidad. Responsabilidad social empresarial y organizacional que cumple, además, con el código sustantivo del trabajo colombiano y que ya están siendo aceptados por las corporaciones autónomas de cada región de Colombia.



## Referencias

1. Yadav G, Luthra S, Huisingh D, Mangla SK, Narkhede BE, Liu Y. Development of a lean manufacturing framework to enhance its adoption within manufacturing companies in developing economies. *J Clean Prod.* 2020 Feb;245:118726. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118726>.
2. Shah R, Ward PT. Defining and developing measures of lean production. *J Oper Manag.* 2007 Jun;25(4):785–805. <https://doi.org/10.1016/j.jom.2007.01.019>.
3. dos Santos Bento G, Tontini G. Developing an instrument to measure lean manufacturing maturity and its relationship with operational performance. *Total Qual Manag Bus Excell.* 2018 Jul;29(9–10):977–995. <https://doi.org/10.1080/14783363.2018.1486537>.
4. Ishikawa K. ¿Qué es el control total de calidad? Medellín: Editorial Norma; 2003.
5. Oakland J. Total Quality Management and Operational Excellence [Internet]. Disponible en: [www.routledge.com/cw/oakland](http://www.routledge.com/cw/oakland)
6. Ikumapayi OM, Akinlabi ET, Mwema FM, Ogbonna OS. Six sigma versus lean manufacturing - An overview. *Mater Today Proc.* 2019;3275–3281. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.986>.
7. Giannetti BF, Agostinho F, Eras JJC, Yang Z, Almeida CMVB. Cleaner production for achieving the sustainable development goals. *J Clean Prod.* 2020 Oct 20;271:122127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122127>.
8. Van Hoof B, Monroy N, Saer A. Producción más limpia: paradigma de gestión ambiental. Bogotá: Universidad de los Andes; 2018 [citado el 04 de septiembre de 2023]. Disponible en: <https://books.google.es>
9. Miltenburg J. Manufacturing strategy: how to formulate and implement a winning plan. Nueva York: Productivity Press; 2005.
10. Ahmad S. Green Human Resource Management: Policies and practices. *Cogent Bus Manag.* 2015 Dec;2(1). <https://doi.org/10.1080/23311975.2015.1030817>.
11. HM Treasury. The Green Book. Londres: Crown Copyright; 2022.
12. Rodríguez M. Culturas organizacionales éticas. *Rev Antropol Sociol Virajes.* 2015;17(1):107–134.
13. Botelho de Sousa T, Costa Melo I, Henrique de Oliveira P, Marcelo Lourenço C, Müller Guerrini F, Francisco Esposto K. Balanced scorecard for evaluating the performance of supply chains: A bibliometric study. 2020.
14. dos Santos Ferreira C, Poltronieri CF, Gerolamo MC. ISO 14001:2015 and ISO 9001:2015: Analyse the relationship between these management systems standards and corporate sustainability. *Gest Prod.* 2019;26(4). <https://doi.org/10.1590/0104-530X3906-19>.

15. Hanson WE, Plano Clark VL, Petska KS, Creswell JW, Creswell JD. Mixed methods research designs in counseling psychology. *J Couns Psychol*. 2005 Apr;52(2):224–235. <https://doi.org/10.1037/0022-0167.52.2.224>.
16. George AL. Case Studies and Theory Development: The Method of Structured, Focused Comparison. 2019. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-90772-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-90772-7_10).
17. Silva D, Luis S. Roteiro para Revisión Bibliográfica Sistemática: Aplicación en el Desarrollo de Productos y Gerenciamiento de Proyectos [Internet]. 2011. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/267380020>
18. Sarwono J. Quantitative, Qualitative and Mixed Method Research Methodology [Internet]. 2022. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/360403377>
19. Hernández Sampieri R, Fernández Collado C, Baptista Lucio P. Metodología de la investigación. 4.a ed. México: McGraw-Hill Interamericana; 2018. p. 310–386.



# Análisis de confort térmico en laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana

Gloria Esther Urrea Ceferino\*  
Natalia Lucia Cuello Diaz\*\*  
Rafael Eduardo Bustos Fuentes\*\*  
Andrea Niampira Daza\*\*\*

---

\* Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigación GICA, Programa Ingeniería Civil, gloria.urrea@upb.edu.co

\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Programa ingeniería civil, natalia.cuello@upb.edu.co, rafael.bustos@upb.edu.co

\*\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigación GICA, Programa Arquitectura, york.niampira@upb.edu.co

## Resumen

Los análisis de confort térmico y estimación de consumo energético en la ciudad de Montería se centran en evaluar la comodidad de distintos tipos de infraestructuras, como viviendas, oficinas, clínicas, centros educativos o laboratorios. Estos estudios proporcionan una estimación de qué tan confortables son estos espacios para sus usuarios y, a su vez, permiten conocer el costo asociado a la refrigeración activa que se requiere para mantener las condiciones óptimas. Además, estos análisis ayudan a conocer si la adecuación de espacios que pasaron de ventilación natural a encerramiento con sistema de refrigeración, incurrió en la reducción de las temperaturas o por el contrario los espacios quedaron confortables. Realizar estudios de confort dentro de las instalaciones educativas surge de la necesidad de tener un ambiente óptimo para que los estudiantes puedan desarrollar las actividades programadas de forma oportuna y cómoda. El objetivo de este estudio fue, por ende, analizar el confort térmico de los laboratorios de ingeniería civil de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), seccional Montería. Siguiendo la norma ISO 7730 e ISO 9920 y mediante el método Fanger, por el cual la toma de datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire, junto con los resultados de encuestas determinaron ciertos parámetros para calcular la sensación térmica, en función del valor del voto medio estimado (PMV) y el porcentaje de personas insatisfechas (PPD) dentro de los laboratorios de ingeniería civil (concretos, pavimentos y suelos). Los cálculos realizados mediante el *software* creado por el centro de investigación de la Universidad de California, en Berkeley, llamado "herramienta de confort térmico CBE", permitió determinar dicho confort en cada laboratorio y, así, analizar los valores obtenidos y las posibles causas de estos resultados. El estudio reveló que un 56,5% de los estudiantes en las aulas de estos laboratorios experimentan sensaciones de sofoco y ligera calidez, lo cual indica un nivel insatisfactorio de confort térmico. Solo el 17,4% se encuentra en el rango neutral, mientras que el 28,3% reporta una sensación fresca o de alto confort térmico. Para mejorar, se propone reducir la temperatura entre 3 y 5 °C con aire acondicionado, aunque se espera un mayor consumo debido a las altas temperaturas en la zona. Finalmente se concluyó que los tres laboratorios no cumplen con los parámetros de confort, según los valores en función del (PMV), por lo que se recomendó hacer un análisis de cargas térmicas que sean tenidas en cuenta para futuras construcciones o remodelaciones en las que se instale una ventilación mecánica adecuada en dichos espacios.

**Palabras clave:** confort térmico, temperatura, laboratorios, ventilación mecánica, ventilación pasiva.



## Abstract

The thermal comfort analysis studies in the city of Montería, in its different spaces, be they called homes, offices, clinical centers, classrooms, or laboratories, are valid because some reforms or adaptations of a room may incur in the mitigation of the temperatures or on the contrary leave the spaces uncomfortable. Carrying out comfort studies within educational facilities arises from the need for an optimal environment so that students inside the classrooms can develop the scheduled activities in a timely and comfortable manner. The study aim is to analyze the thermal comfort of the civil engineering laboratories of the Universidad Pontificia Bolivariana, Montería section. Following the ISO 7730 and ISO 9920 standards through the Fanger method with which by taking data on temperature, relative humidity, air speed and the results of surveys, to calculate the thermal sensation based on the value of the predicted mean vote (PMV) and predicted percentage of dissatisfied (PPD) within the civil engineering laboratories (concrete, pavements, and floors). The study revealed that 56.5% of students in laboratory classrooms experience sensations ranging from stifling to slightly warm, indicating an unsatisfactory level of thermal comfort. Only 17.4% are within the neutral range, while 28.3% report a cool or high thermal comfort sensation. To reduce the temperature by 3 to 5 °C with air conditioning, although expected higher consumption due to the high temperatures in the area. The experiments carried out using the software created by the research center of the University of California, Berkeley, called the CBE thermal comfort tool, made it possible to determine the level of thermal comfort of each laboratory (PPV and PMV) and thus analyze the values obtained and the possible Causes of these results. The conclusion was three laboratories didn't match the comfort parameters according to the values based on the estimated average vote, and demonstrated to carry out an analysis of thermal loads so that in future constructions or remodeling they are took into account to install adequate mechanical ventilation for that space.

**Keyword:** Thermal Comfort, Temperature, Laboratories, Mechanical Ventilation, Passive Ventilation.

## I. Introducción

El confort térmico, según la norma ISO 7730<sup>1</sup>, se refiere a la sensación de satisfacción con el entorno térmico, y se ve influenciado por el cambio climático en espacios donde las personas pasan la mayor parte del día, como en el trabajo, la escuela o la universidad. Por tanto, el confort térmico es un aspecto fundamental en estos entornos. La discusión sobre el confort térmico inició en los años 30 del siglo XX, en los modelos "estable" y adaptativo basados en la teoría de la adaptación del cuerpo humano al clima interior y exterior de las edificaciones<sup>2</sup>.

Los tres métodos comunes para evaluar la precisión predictiva del modelo PMV-PPD son: 1) graficar la relación lineal entre los votos predichos (PMV o PPD) y observados (sensación térmica o porcentaje de insatisfechos); 2) comparar la relación entre "sensación térmica observada - porcentaje de insatisfechos (PD)" o "PMV - PD" con el modelo original PMV-PPD. Por último, 3) se analizan diferentes estudios de campo para demostrar que la relación entre PPD y PD es débil, lo que lleva a la eliminación del modelo PPD en la versión más reciente del estándar 55 ASHRAE<sup>3-5</sup>.

En Colombia existe una diversidad climática, determinada principalmente por la altitud y sus pisos térmicos, por lo que, en diferentes partes del país, el clima tiene diferentes comportamientos por lo que las condiciones de confort varían según el lugar que se analice. Por ello, a la hora de diseñar y construir una edificación es importante realizar estudios de temperatura y confort térmico y, así, construir edificaciones sostenibles que no necesiten ventilación mecánica para mitigar los gastos de energía<sup>6</sup>.

El clima de Montería se caracteriza por ser cálido tropical. El promedio de lluvia total anual es de 1262 mm. Durante el año se presenta una temporada seca y una temporada de lluvias. La temporada seca se extiende de diciembre a marzo. En estos meses llueve entre 1 y 4 días al mes. De mayo a octubre se presenta la temporada de lluvias, cuya frecuencia de días lluviosos es de 11 a 13 días por mes. Los meses de abril y noviembre pueden considerarse de transición y, en promedio, se registran alrededor de 8 días de lluvia por mes<sup>6</sup>.

Por otra parte, la construcción de espacios es un verdadero desafío en un clima húmedo tropical, puesto que toda infraestructura debe ofrecer confort en situaciones extremas de calor y lluvia, consumir lo mínimo de energía con sistemas de enfriamiento, incorporar energías verdes, estar rodeada de zonas verdes, ser construida en el menor tiempo posible, a menor costo, mayor durabilidad, proporcionando una apariencia moderna, sustentable, sostenible, usando los materiales



más adecuados para climas cálidos y dar satisfacción a sus usuarios. Estos ajustes se darán cuantificando el nivel de confort que ofrecen algunos lugares construidos, reformados y adaptados a sistemas activos de enfriamiento.

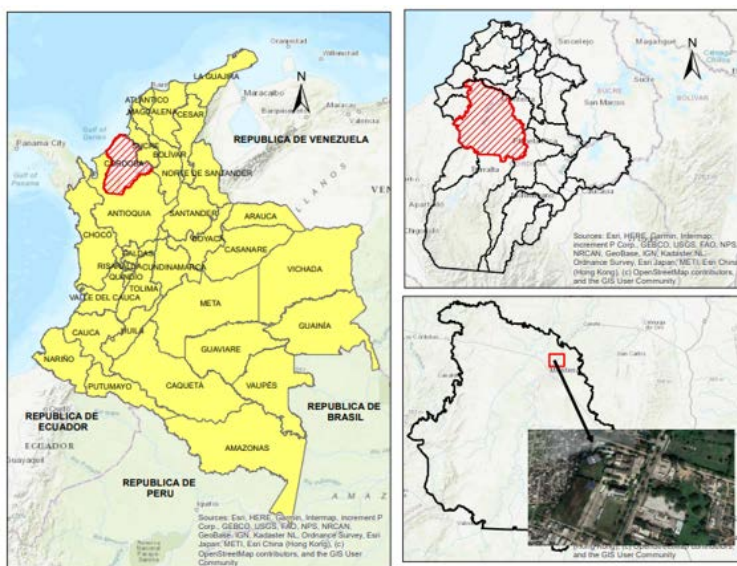
Este estudio se enfoca en el análisis de confort térmico de los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y se realizó con el fin de conocer qué grado de confort hay dentro de los laboratorios de suelos, pavimentos y concretos.

## 2. Metodología

Se llevó a cabo una búsqueda de información en la localización de la zona de estudio, la UPB de Montería, específicamente, en los laboratorios especializados en áreas de ingeniería civil. Además, se realizó una encuesta entre los usuarios de dichos espacios, para evaluar su percepción del confort térmico dentro de las instalaciones, aplicando la metodología ASHRAE 55 y una estimación del consumo energético.

### 2.1 Ubicación

Figura 1. Localización de la zona de estudio.



Fuente: elaboración propia, a partir de una adaptación en Arcgis y Google Earth.

La Universidad Pontificia Bolivariana está ubicada en la Cra. 6 # 97A - 99, Montería, Córdoba, Colombia. Se encuentra a 8°48'16" N 75°51'01" W, con una altura de 15 m s. n. m. Esta universidad cuenta con 3 bloques académicos, los cuales son el bloque principal 1, el bloque de los laboratorios 2 y el bloque 3.

## 2.2 Descripción

El Bloque 2, inaugurado en el año 2002, es una edificación de un piso con 1901 m<sup>2</sup>, en el cual se hallan los laboratorios de diferentes programas académicos, como Ingeniería Electrónica, Mecánica, Civil, Sanitaria y Ambiental, Agroindustrial y el programa de Comunicación Social.

Los laboratorios de la UPB son aulas que cuenta con ciertos equipos que ayudan a desarrollar los ensayos de laboratorio a los estudiantes de determinadas áreas, de manera más eficiente, estos laboratorios almacenan los materiales, los equipos y las guías para realizar diversos ensayos.

- **Laboratorio de suelos**

Los laboratorios tienen materiales como teja de zinc, cielo raso, ladrillo de espesor de 12 centímetros, ventanas que están en dirección este y oeste, barrotes en las ventanas de hierro, al igual que las puertas. Aunque cuenta con algunos árboles a su alrededor, están al final de un corredor verde, el impacto de radiación sobre el techo, lo convierte en el principal factor que desafía la carga de calor al interior de esta infraestructura.

El laboratorio de suelos tiene equipos tales como balanzas, máquina de consolidación, extractor de muestras de tubos de shelby, equipo de corte directo digital, compresor de aire, horno eléctrico, bomba de vacío, máquina de compresión encofinada y agitador eléctrico. El sistema de enfriamiento que se utiliza aquí es el aire tipo Split.



**Figura 2.** Laboratorio de suelos.



- **Laboratorios de pavimentos**

Los equipos que se encuentran en el laboratorio de pavimentos son péndulos TRRL, penetrómetro de asfalto, balanzas digitales, horno eléctrico, horno mufla, viscosímetro Saybolt digital, ductilímetro, prensa marshal, baño de maría, extractor de muestras CBR con gato hidráulico y presa de CBR.

**Figura 3.** Laboratorio de pavimentos.



- **Laboratorios de concretos**

Los equipos de este laboratorio son máquina de compresión y flexión de concreto, máquina de compresión de cilindros de concreto, diferentes tipos de balanzas, mesa de flujo, tamizador eléctrico, taladro toma muestra de núcleo de concreto y un horno eléctrico.

El sistema de refrigeración que se usa aquí es aire acondicionado tipo conducto. El cual está constituido por un sistema centralizado y otro sistema de distribución del aire que está instalado en las zonas de falso techo en los laboratorios, este procedimiento se realiza a partir de un sistema de rejillas que se colocan en puntos específicos que puedan regular el flujo del aire del laboratorio.

**Figura 4.** Laboratorio de concretos.

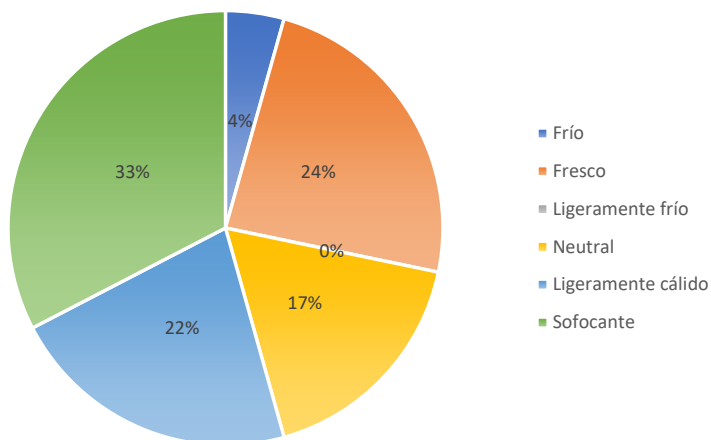


## 2.3 Encuesta realizada a los usuarios

Teniendo en cuenta la percepción de cada alumno acerca del confort térmico, se pudo hallar que la mayoría de los estudiantes concuerda en que las aulas son adecuadas para estar en clases entre 1 y 2 horas; esto quiere decir que, en los casos en los cuales se necesita impartir clases de más de 2 horas, el grado de sofocación dentro de las aulas aumenta notoriamente.

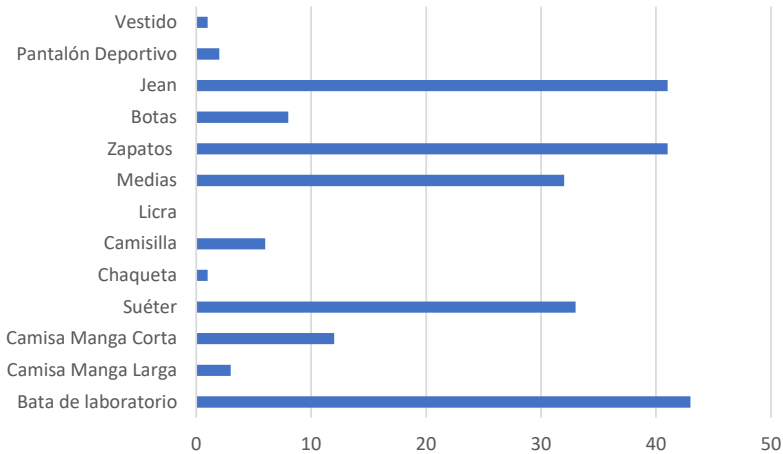


**Figura 5.** Sensación térmica de encuestados.



La sensación térmica dentro de las aulas de laboratorio, según los encuestados, se puede describir así: sofocante 32,6%, fresca 23,9%, ligeramente cálida 21,7%, neutral 17,4%, y ligeramente fría 4,4%. Esto quiere decir que un 56,5% de los estudiantes tiene, dentro de los laboratorios, una sensación entre sofocante y ligeramente cálida, lo que representa un alto número de personas cuyo grado de confort térmico es insatisfactorio. El 17,4% se encuentra dentro del rango en el que dicho grado de confort es neutral, es decir, que no tienen una sensación de calor o de frío. El 28,3% tiene una sensación fresca o, lo que es igual, una sensación de confort térmico, con lo cual se evidencia que, dentro de las aulas de laboratorio con un número alto de estudiantes, la gran mayoría no se siente satisfecha con la sensación térmica de estos lugares.

Con la información de la Figura 6 se pudo conocer el tipo de ropa que utilizan los estudiantes al interior de los laboratorios. La gran mayoría utiliza suéter, medias, zapatos, jean, además de la bata de laboratorio, que es obligatoria, por lo tanto, todos la utilizan al entrar. Este tipo de ropa está definida, según la INSHT-NTP747, como "ropa ligera", y es la más utilizada en la zona donde se realizó el estudio, por tener un clima cálido. Dicha ropa tiene un valor de aislamiento de 0,5 Clo.

**Figura 6.** Vestimenta usada por los encuestados.

## 2.4 Cálculo computacional

Para realizar los cálculos del PMV y PPD se utilizó el *software* creado por el centro de investigación de la Universidad de California, Berkeley. Esta herramienta predice el confort térmico de acuerdo con ASHRAE Standard 55, con visualizaciones de los límites de confort por medio de gráficos psicrométricos o de temperatura/humedad y generación automática de documentación LEED para créditos de confort térmico. Además, incluye modelos para sistemas constructivos convencionales (PMV) y también para el confort, basados en el modelo de confort adaptativo.

## 3. Resultados y discusiones

### Datos de los laboratorios

En la Tabla 1 se indican las variables medidas en cada uno de los laboratorios analizados.



**Tabla 1.** Datos de los laboratorios

<b>Variables</b>	<b>Lab. de suelos</b>	<b>Lab. de pavimentos</b>	<b>Lab. de concretos</b>
Temperatura (°C)	25,7	26,8	28,7
Humedad relativa (%)	67	69	75,1
Tasa metabólica (W/m²)/met	100/1,72	100/1,72	100/1,72
Aislamiento de la ropa (clo)	0,5	0,5	0,5
Velocidad del aire (m/s)	0	0	0

### 3.2 Consumo energético de los laboratorios

En función de lo anterior, el aire acondicionado busca reducir la temperatura entre 3 y 5 °C en los laboratorios. El consumo del sistema será mucho mayor debido a que la zona en la que se encuentran los laboratorios presenta altas temperaturas y llegar a la zona de confort térmico es bastante complicado<sup>8</sup>.

Para realizar los cálculos se necesita conocer los valores del consumo de energía del aire acondicionado, las horas de uso diario y el costo del Kw/h.

*Ecuación 1:* Consumo diario de un aire acondicionado

$$\begin{aligned}
 CD &= \text{Consumo diario} \\
 CAA &= \text{Consumo de energía del AA} \\
 N &= \text{horas de consumo diarias} \\
 CD &= CAA * N
 \end{aligned}$$

*Ecuación 2:* Gasto diario de un aire acondicionado

$$\text{Gasto diario} = \text{Consumo diario} * \text{costo del } \frac{Kw}{h}$$

Se tiene un consumo diario de 8 horas (lunes a viernes) y de 4 horas (sábados). Para la tarifa de energía eléctrica se utilizaron los valores regulados por la comisión de regulación de energía y gas (CREG), correspondientes a 1030 cop/kWh (febrero de 2024). Se debe tener en cuenta que el consumo y el gasto económico de los aires

acondicionados será el mismo, debido a que las dos poseen la misma capacidad de enfriamiento.

$$1 \text{ BTU} - 0.000293071 \text{ KW} \rightarrow 60000\text{BTU} - 17.584264 \text{ KW}$$

Consumo semanal por laboratorio:

$$\text{Consumo semanal} = 1 \text{ BTU} * ((8\text{h} * 5) + 4\text{h}) = 773.707 \text{ Kw}$$

$$\text{Gasto Semanal} = \text{Consumo semanal} * 1030 \frac{\text{COP}}{\text{KWh}} = 796.918.210 \text{ COP}$$

$$\text{Gasto Mensual} = 3'187.672.840 \text{ COP}$$

$$\text{Gasto Semestral} = 12'750.691.360 \text{ COP}$$

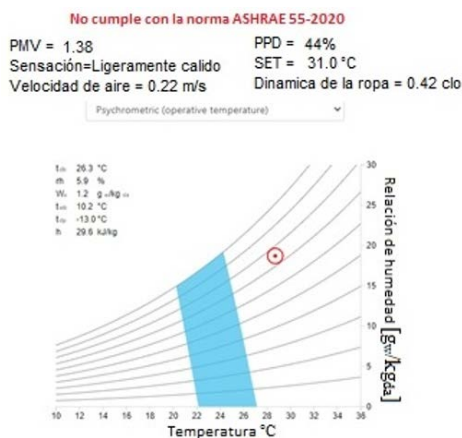
### 3.3 Análisis de resultados

- Los resultados del PMV y PPD evidencian que los laboratorios no cumplen con las especificaciones de la ASHRAE 55<sup>9</sup>, en cuanto al confort térmico.
- Según las condiciones de temperatura dadas en las gráficas, el rango de confort térmico ideal para los laboratorios estaría entre 22 °C y 26 °C.
- Los factores que pudieron incidir de forma negativa, a la hora de calcular el confort térmico, son los siguientes: el uso de la edificación, la distribución de los equipos en el reducido espacio de los laboratorios y la cantidad de estudiantes, que sobrepasa la capacidad de dichos lugares.
- Otro de los factores que afecta el confort térmico pueden ser las fugas que se generan cuando en las prácticas de laboratorios se dejan las puertas mal cerradas y las ventanas semiabiertas, o que los laboratorios no estén bien sellados y esto permita la entrada del aire caliente a la edificación.
- Además, los laboratorios no reciben de manera óptima la ventilación natural, ya que al estar rodeados de un lado por una pared más alta y del otro lado aulas de clase, es casi imposible sentir la ventilación natural dentro de las aulas.



- La falta de vegetación en el pasillo que rodea los laboratorios afecta en gran manera el confort térmico; sin embargo, por este se evacúan los residuos generados en la universidad y se realizan algunas prácticas de laboratorio que requieren el espacio suficiente para la elaboración de la mezcla, por ende, no se puede obstaculizar el paso con árboles u otro tipo de vegetación.
- **Laboratorios de concretos**

**Figura 7.** Cálculo de confort térmico del laboratorio de concretos.

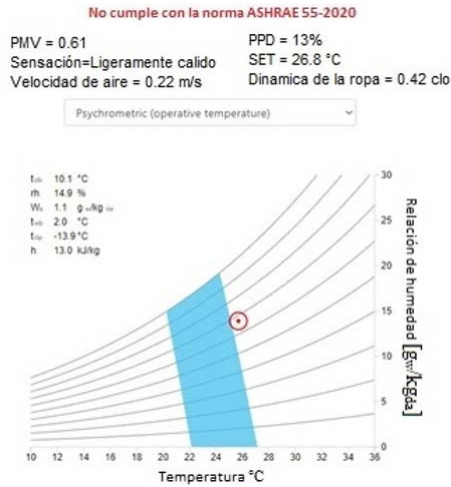


En el laboratorio de concretos, el resultado del PMV indicó un valor de 1.38, que entra en el rango de "ligeramente caluroso" y "caluroso"; y un PPD del 44%, que representa el porcentaje de personas insatisfechas.

- **Laboratorio de suelos**

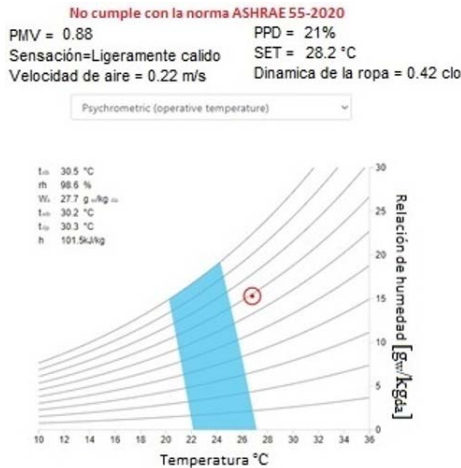
En el laboratorio de suelos el resultado del PMV indicó un valor de 0,60, que entra en el rango de "neutro" y "ligeramente caluroso"; y un PPD del 13%, que representa el porcentaje de personas insatisfechas.

Figura 8. Cálculo de confort térmico del laboratorio de suelos.



- Laboratorio de pavimentos

Figura 9. Cálculo de confort térmico del laboratorio de pavimentos.



En el laboratorio de suelos el resultado del PMV indicó un valor de 0,88, que entra en el rango de "neutro" y "ligeramente caluroso"; y un PPD del 21 %, que representa el porcentaje de personas insatisfechas.



## 4. Conclusiones

- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el PMV ninguno de los tres laboratorios analizados cumple con los estándares de confort térmico que establece la ASHRAE 55.
- La falta de árboles alrededor de los laboratorios es un factor que puede limitar el confort térmico; sin embargo, la presencia o no de árboles puede verse minimizada por la calidad térmica de los laboratorios y los materiales de construcción.
- Se recomienda llevar los aires acondicionados de 18 a 22 °C. Normalmente se utilizan los aires acondicionados con la menor temperatura posible, que puede estar entre los 16 y 18 °C. Esta recomendación de trabajar a 22 °C se fundamenta en el estudio realizado en el método Fanger, el cual arrojó como resultado que el rango de confort térmico se encuentra entre 22 y 26° C, esto para evitar que el equipo de aires acondicionados tenga gastos elevados.
- Se recomienda hacer un estudio detallado de cargas térmicas para determinar las especificaciones con las que se debe instalar la ventilación mecánica por el método HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning).
- Con los resultados obtenidos en los consumos energéticos de los aires acondicionados nos podemos dar cuenta de que, a pesar de tener la misma capacidad de enfriamiento y gastos económicos, los aires tipo Split tienen una eficiencia mayor que los aires tipo conducto.
- Para futuras remodelaciones o nuevas construcciones se recomienda realizar simulaciones en *software*, para dar soluciones activas de construcción o utilizar los mejores espacios y materiales, de acuerdo al uso de la edificación.

## 5. Recomendaciones

Para futuras investigaciones, sería óptimo comparar, en la misma área, las diferentes modificaciones que se realizaron a la zona del bloque 2 de la UPB, sede Montería. Estudiar el confort que ofrecen las tejas de zinc en combinación de cielo raso, como la madera (Figura 10.a), los calados totalmente cubiertos (Figura 10.b), los calados totalmente cubiertos con vidrio (Figura 10.c), salones con ventiladores y aire acondicionado (Figura 10.a), o solo con aire acondicionado (Figura 2); además, verificar la conductividad de cada material, el confort que ofrecen los espacios y estimar el consumo energético. Con estas investigaciones se puede obtener la

información suficiente para garantizar la forma más eficiente de hacer remodelaciones y adecuaciones en la infraestructura del campus universitario de la UPB, sede Montería, de acuerdo al clima de la región.

**Figura 10.** Salones del bloque 2 en la UPB-Montería, con uso de cielo raso con otros materiales.



a.



b.



c.

## Referencias

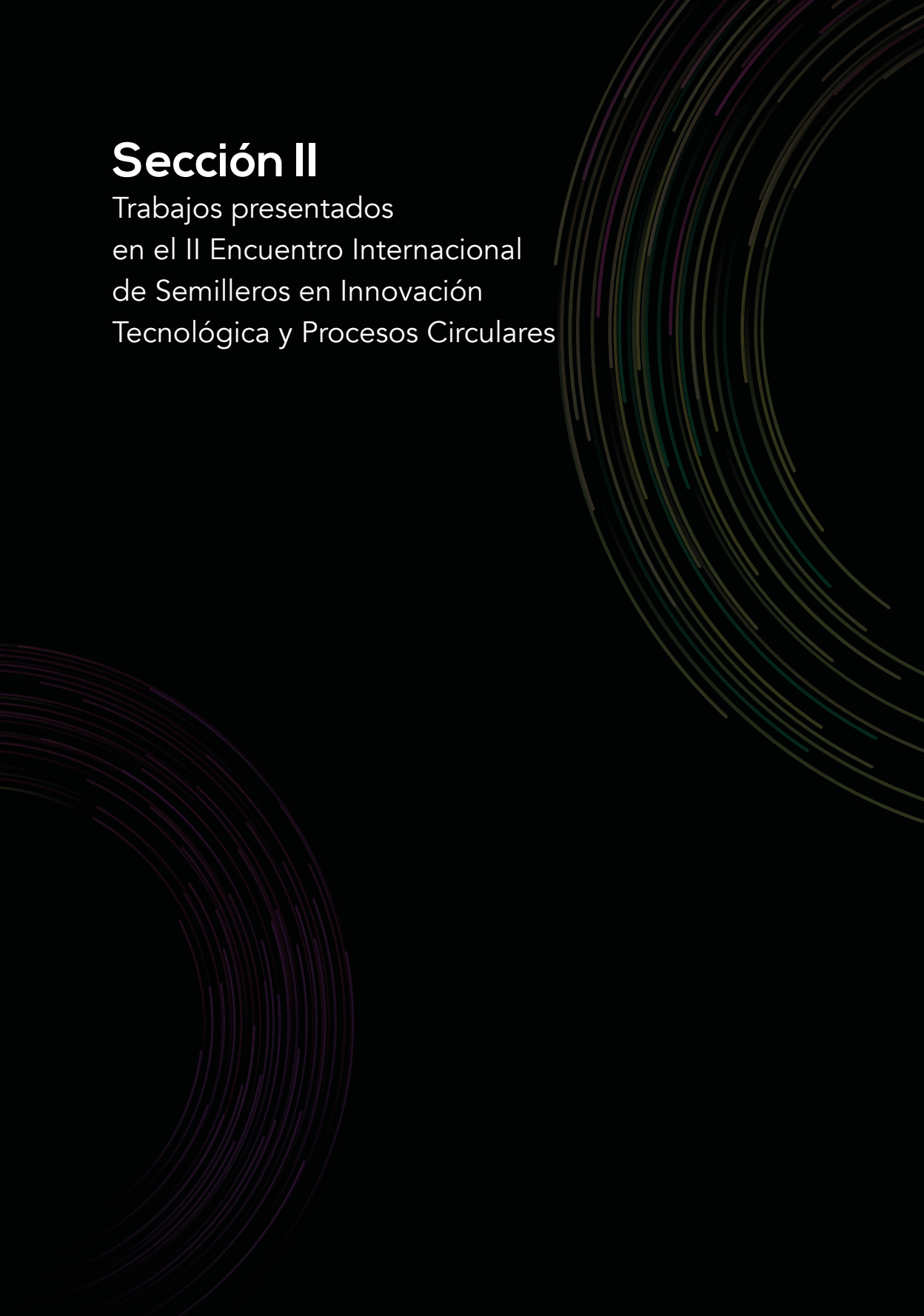
1. Asociación Española de Normalización (UNE). Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local (ISO 7730:2005). UNE-EN ISO 7730:2006. Madrid: UNE; 2006. Disponible en: <https://www.une.org/encontrar-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0037517>.
2. Teleghani M, Tenpierik M, Kurvens S. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;(2):201-215.
3. Calis G, Kuru M. Assessing user thermal sensation in the Aegean region against standards. *Sustainable Cities and Society* [Internet]. 2017 [Consultado el 15 de agosto de 2023];(29):77-85. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.11.013>.



4. Dear R, Brager G. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference [Internet]. Berkeley: Center for the Built Environment, UC Berkeley; 1998 [Consultado el 15 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6>.
5. Takasu M, Ooka R, Rijal HB, Indraganti M, Singh MK. Study on adaptive thermal comfort in Japanese offices under various operation modes. Build Environ [Internet]. 2017 [Consultado el 18 de agosto de 2023];(118):273-288. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.023>.
6. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Características climatológicas de ciudades principales y municipios turísticos [Internet]. Bogotá: IDEAM; 2023 [Consultado el 3 de agosto de 2023]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/418894/Caracter%C3%ADsticas+de+Ciudades+Principales+y+Municipios+Tur%C3%ADsticos.pdf/c3ca90c8-1072-434aa235-1baee8c73fc>.
7. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST). NTP 74: Confort térmico - Método de Fanger para su evaluación. Madrid: INSST; 1990.
8. Iturbe M. Petición al Gobierno de España para que autorice la actividad de las empresas instaladoras durante el Estado de Alarma provocado por el COVID-19 [Internet]. LinkedIn; 2020 [Consultado el 18 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/company/caloryfrio>.
9. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Standard 55: Specifies conditions for acceptable thermal environments [Internet]. Atlanta: ASHRAE; 2020 [Consultado el 18 de agosto de 2023]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55>.

# Sección II

Trabajos presentados  
en el II Encuentro Internacional  
de Semilleros en Innovación  
Tecnológica y Procesos Circulares





# Fibra vegetal del vástago de plátano: una alternativa para el aumento de resistencia del mortero

Ricardo Alberto Díaz Sofan\*  
Elías José Quintana Ricardo\*  
Ana Maria Martinez\*  
Sebastian Argumedo\*  
Gloria Urrea Ceferino\*\*

---

\* Universidad Pontificia Bolivariana, estudiantes de Ingeniería Civil  
ricardo.diaz@upb.edu.co; elias.quintana@upb.edu.co; ana.matirnezv@upb.edu.co;  
sebastian.argumedo@upb.edu.co mailto:sebastian.madera@upb.edu.co

\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigación GICA, programa de Ingeniería Civil; gloria.urrea@upb.edu.co. Autor para correspondencia

## Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento de las propiedades mecánicas del mortero al incorporar el vástago de plátano. Se tomó como punto de partida las plantas de plátano cultivadas en el departamento de Córdoba. Luego se realizaron combinaciones de mortero con solo arena (MA), mortero con fibra (MF) y mortero con fibra tratada de forma alcalina (MFT). Además, se elaboraron muestras para verificar la resistencia y la tracción, en comparación con los morteros convencionales. Los resultados de las muestras de mortero en el que la muestra con mayor resistencia a compresión a los 28 días es aquella que contiene cemento, arena y un aditivo de fibra tratado, con una resistencia de 22.44 MPa. En el caso del ensayo de flexión, se observó que la vigueta de cemento y arena sin aditivos logró la mayor resistencia a los 28 días, con 2.07 MPa. Se concluye que la utilización del vástago de plátano sí aumenta la resistencia en el mortero, y la razón por la cual la muestra con fibra tratada muestra una mayor resistencia puede atribuirse a las propiedades mejoradas que ofrece la fibra tratada.

**Palabras clave:** propiedades mecánicas, compresión, tracción, tratamiento de fibras, compuesto cementante.

## Abstract

The research aims to investigate the mechanical properties of mortar when incorporating banana stems from the department of Córdoba. Firstly, from the department of Córdoba the banana plants were collected. Subsequently, mortar formulations were prepared including: pure sand mortar (MA), fiber-reinforced mortar (MF), and alkali-treated fiber-reinforced mortar (MFT). Additionally, the samples were tested for resistance and traction in comparison to conventional mortars. The mortar samples exhibited the highest compressive strength, reaching a resistance of 22.44 MPa on the 28th day of the curing process. In terms of the bending test, the combination of cement and sand demonstrated the highest resistance at 28 days, measuring 2.07 MPa. In conclusion, the incorporation of banana stems enhances the mortar's resistance. The greater strength observed in the alkali-treated fiber-reinforced sample can be attributed to the improved properties offered by the treated fiber.

**Keywords:** Mechanical Properties, Compression, Traction, Fiber Treatment, Cementing Compound.



## I. Introducción

Desde el desarrollo de los materiales industrializados, incluidos el acero y el hormigón, los materiales naturales o vegetales han sido descartados para uso estructural<sup>1</sup>. Si bien las propiedades mecánicas de estos materiales son menos predecibles que las de los materiales industriales, están fácilmente disponibles en muchos lugares rurales y se pueden usar con un procesamiento significativamente menor. El impacto positivo de esta investigación parte de la funcionalidad de las fibras naturales, su gran auge por la contribución ecológica y amigable con el medio ambiente y por implementar asertivamente el reemplazo de los materiales derivados del petróleo, tales como las fibras sintéticas (fibra de polipropileno, fibra de poliéster y fibra de polietileno,) ya que estas pueden causar daños a la corteza terrestre y marítima; además, del creciente uso de las materias primas biodegradables y renovables. A nivel nacional es viable la utilización de fibra del pseudotallo de plátano mezclado con PET y mortero para la fabricación de prototipos de tanques para depósitos de agua<sup>2</sup>.

Según el Instituto Colombiano Agropecuario<sup>3</sup>, se estima que, en el departamento de Córdoba, hay sembradas alrededor de 29.152 hectáreas de plátano de la variedad hartón, lo cual genera un residuo agroindustrial que no se gestiona ni se reaprovecha. Por otra parte, la producción total de volumen de cemento a nivel mundial se estimó en 4.1 billones de toneladas, en 2022<sup>4</sup>; mientras que en Colombia la producción anual de cemento gris fue de 1.116,5 miles de toneladas<sup>5</sup>. La problemática radica en que la industria del cemento, por sí sola, emite aproximadamente el 7% del total de dióxido de carbono procedente de las actividades humanas en todo el mundo<sup>6</sup>. El alcance de este trabajo es la incorporación del residuo del vástago de plátano (producido en el departamento de Córdoba) a procesos circulares de producción de matrices cementantes que se refuerzan con fibras, ya que las que actualmente se usan son sintéticas, derivadas del petróleo y con un alto consumo energético en su elaboración. Se requiere comprobar el comportamiento mecánico con compresión y flexión; además de la influencia del tratamiento alcalino en la fibra vegetal.

## 2. Métodos

Esta investigación se llevará a cabo con base en una serie de estudios y análisis basados en el propósito, que es conocer el aporte que el vástago de plátano hace a una mezcla de mortero; por lo tanto, se sostendrá con un enfoque metodológico

de tipo mixto, ya que se tendrán en cuenta un conjunto de variables y categorías las cuales estarán estructuradas y basadas en datos obtenidos<sup>7</sup> a partir de los ensayos de las propiedades físico que se realizaron a los morteros.

## 2.1 Materiales

La arena fue extraída de la rívera de río Sinú. Se determinó que el contenido de materia orgánica en la muestra es normal. El módulo de finura obtenido fue de 1.83 y el tamaño máximo de los agregados en la muestra se determinó en 3/8. Según el ensayo, el tamaño máximo nominal obtenido fue n.º 30, lo cual indica que hay partículas con diámetros superiores a n.º 30 (0.6 mm) presentes en la muestra. Además, el peso específico aparente de la muestra se registró en 2.51 gr/cm<sup>3</sup> y se obtuvo un peso específico aparente de 2.54 gr/cm<sup>3</sup>. El peso específico nominal se determinó en 2.58 gr/cm<sup>3</sup>; y la absorción de la muestra en 1.21 %.

El cemento utilizado en la investigación es el hidráulico, producido por cemento Argos y correspondiente a la norma ASTM C1157/C1157M-20, con una densidad de 2.54 gr/cm<sup>3</sup>.

La fibra de vástago de plátano se sumerge en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) durante un tiempo determinado para eliminar la lignina y otros componentes no celulósicos de la fibra<sup>9</sup>. La lignina es un componente no deseado en la fibra, ya que puede reducir la capacidad de esta para unirse al cemento en el mortero. Después de la inmersión en la solución alcalina, la fibra debe lavarse cuidadosamente en agua destilada, para eliminar cualquier residuo de la solución antes de ponerse a secar.

## 2.2 Matriz cementante

En esta matriz se realizarán diferentes tipos de ensayo en muestras de mortero variadas, se tomarán tres tipos de muestra (una muestra de cemento más arena; otra de cemento, arena más el 0,3% de fibra sin tratar y otra de cemento, arena más 0,3% de fibra tratada), tanto para los cubos como para las viguetas que se van a analizar a compresión y, así, comprender el comportamiento del mortero con los diferentes diseños de la mezcla. Algunos de los ensayos a realizar serán de resistencia a la tracción y a la flexión.



**Tabla 1.** Condiciones de los matrices cementantes

<b>Condición de las matrices cementantes</b>	
<b>MA</b>	Mortero con solo arena
<b>MF</b>	Mortero con fibra
<b>MF-T</b>	Mortero con fibra tratada

**Tabla 2.** Formulación de los matrices cementantes

<b>Matriz</b>	<b>Formulación con matrices cementantes</b>			
	<b>Sin fibra</b>		<b>Con fibra</b>	
	<b>Peso (gr)</b>	<b>Volumen</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>Volumen</b>
Cemento	1507	473,67	1507	473,67
Arena	3310,41	1117,67	3310,41	1117,67
Agua	1054,92	940,26	1054,92	940,26
Fibra	0	0	17,61	15,69
<b>Total</b>	<b>5872,33</b>	<b>2534,4</b>	<b>5889,94</b>	<b>2550,09</b>

## 2.3 Ensayos de las propiedades físico-mecánicas

Los ensayos de compresión y flexión fueron realizados en la máquina multiusos de la marca Pinzuar, de la Universidad Pontificia Bolivariana.

# 3. Resultados y discusiones

## 3.1 Análisis de compresión

Al comparar los resultados de las muestras de mortero, se observa que la muestra con mayor resistencia a la compresión, a los 28 días, es aquella que contiene cemento, arena y un aditivo de fibra tratado. La resistencia fue de 22.44 MPa.

Esta muestra supera en resistencia a las otras dos muestras evaluadas: el mortero de cemento y arena sin aditivos, que obtuvo una resistencia de 20.63 MPa, y el mortero de cemento, arena y fibra sin tratar, que obtuvo una resistencia de 21.36 MPa. La razón por la cual la muestra con fibra tratada obtuvo una mayor resistencia puede atribuirse a las propiedades mejoradas que ofrece la fibra tratada. Las fibras tratadas suelen tener características especiales, como un mejor anclaje en la matriz del mortero y una mayor capacidad para resistir la formación de grietas.

**Tabla 3.** Análisis de compresión a 28, 14 y 7 días

ANÁLISIS A COMPRESIÓN					
28 DÍAS					
MF VS MA	MF	MA	T=	2.9157521	HAY
MEDIA	21.36	20.633333	P=	0.0434275	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.1429	0.0434333			
MF VS MA	MFT	MA	T=	8.5441783	HAY
MEDIA	22.44	20.633333	P=	0.0010299	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0907	0.0434333			
MF VS MF	MFT	MF	T=	3.8703297	HAY
MEDIA	22.44	21.36	P=	0.0179884	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0907	0.1429			
14 DÍAS					
MF VS MA	MF	MA	T=	0.5653491	HAY
MEDIA	18.366667	17.352	P=	0.6020401	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	2.9733333	6.690172			
MF VS MA	MFT	MA	T=	3.4804188	HAY
MEDIA	22.876667	17.352	P=	0.0253423	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.8689333	6.690172			
MF VS MF	MFT	MF	T=	3.9851385	HAY
MEDIA	22.876667	18.366667	P=	0.016331	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.8689333	2.9733333			
7 DÍAS					
MF VS MA	MF	MA	T=	1.3345625	HAY
MEDIA	11.999333	10.346667	P=	0.2529208	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	3.5253613	1.0752333			
MF VS MA	MFT	MF	T=	5.5148007	HAY
MEDIA	18.736667	11.996667	P=	0.0052767	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.9410333	3.5400333			
MF VS MF	MFT	MA	T=	11.83163	HAY
MEDIA	18.496667	10.346667	P=	0.0002921	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.3482333	1.0752333			

Fuente: elaboración propia.



Estas propiedades mejoradas ayudan a fortalecer la estructura del mortero y fortalecen una mayor resistencia a la compresión. Además, el uso de fibras tratadas puede mejorar la distribución de las cargas y reducir la concentración de tensiones, lo que contribuye a una mayor resistencia general del mortero.

### 3.2 Análisis de flexión

Al analizar los resultados de las viguetas de mortero sometidos a pruebas de flexión, se observa que la vigueta de cemento y arena sin aditivos logró mayor resistencia a los 28 días, con 2.07 MPa. Le siguen la vigueta de cemento, arena y 0.3% de fibra sin tratar, con una resistencia de 1.62 MPa; y la vigueta de cemento, arena y 0.3% de fibra tratada, con una resistencia de 1.50 MPa.

En este caso, la muestra más resistente es la vigueta de cemento y arena sin aditivos, que supera en resistencia a las otras dos muestras evaluadas. La ausencia de fibras en esta muestra puede permitir una mejor distribución de las cargas a través del mortero, lo que contribuye a una mayor resistencia a la flexión. Existen otros factores que podrían influir en la mayor resistencia de la vigueta de cemento y arena sin aditivos en comparación con las muestras que contienen fibras. Uno de estos factores puede ser la consistencia y la compactación, pues la mezcla de cemento y arena sin aditivos es más consistente y puede ser compactada de manera más uniforme durante el proceso de colocación y curado, lo cual contribuiría a una mejor adherencia y mayor densidad en la estructura de la vigueta, es decir, una mayor resistencia a la flexión.

**Tabla 4.** Análisis a flexión a 28, 14 y 7 días

ANÁLISIS A FLEXIÓN					
28 DÍAS					
MF VS MF	MFT	MF	T=	-2.692308	HAY DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
MEDIA	1.5033333	1.62	P=	0.0545274	
VARIANZA	0.0004333	0.0052			
MF VS MA	MFT	MA	T=	-6.444805	HAY DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
MEDIA	1.5033333	2.0733333	P=	0.0029829	
VARIANZA	0.0004333	0.0230333			
MF VS MA	MF	MA	T=	-4.673015	HAY DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
MEDIA	1.62	2.0733333	P=	0.009497	
VARIANZA	0.0052	0.0230333			

ANÁLISIS A FLEXIÓN					
14 DÍAS					
MF VS MF	MFT	MF	T=	-2.118458	HAY
MEDIA	1.33	1.6166667	P=	0.1015182	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0397	0.0152333			
MF VS MA	MFT	MA	T=	-3.360672	HAY
MEDIA	1.33	1.73	P=	0.0282872	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0397	0.0028			
MF VS MA	MF	MA	T=	-1.461774	HAY
MEDIA	1.6166667	1.73	P=	0.2176126	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0152333	0.0028			
7 DÍAS					
MF VS MF	MFT	MF	T=	-2.349143	HAY
MEDIA	1.19	1.5133333	P=	0.0785888	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0031	0.0537333			
MF VS MA	MFT	MA	T=	-7.172402	HAY
MEDIA	1.19	1.78	P=	0.0020006	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0031	0.0172			
MF VS MA	MF	MA	T=	-1.73122	HAY
MEDIA	1.5133333	1.78	P=	0.1579014	DIFERENCIA SIGNIFICATIVA
VARIANZA	0.0537333	0.0172			

Fuente: elaboración propia.

Las fibras, tratadas o no, introducen cierta cantidad de discontinuidades en la matriz del mortero, lo que puede debilitar la estructura y disminuir su resistencia a la flexión. Además, el hecho de que la muestra con fibra sin tratar tenga una resistencia ligeramente mayor que la muestra con fibra tratada sugiere que el tratamiento de las fibras no puede haber sido efectivo para mejorar las propiedades mecánicas en este caso.

## 4. Conclusiones

Al comparar los resultados de las muestras de mortero fue posible concluir que la muestra con mayor resistencia a la compresión, a los 28 días, es aquella que contiene cemento, arena y un aditivo de fibra tratado, con una resistencia de 22.44 MPa. Esta muestra supera en resistencia a las otras dos muestras evaluadas: el mortero de cemento y arena sin aditivos; y el mortero de cemento, arena y fibra sin tratar, que obtuvieron una menor resistencia.



La razón por la cual la muestra con fibra tratada muestra una mayor resistencia puede atribuirse a las propiedades mejoradas que ofrece la fibra tratada. Las fibras tratadas suelen tener características especiales, como un mejor anclaje en la matriz del mortero y una mayor capacidad para resistir la formación de grietas. Estas propiedades mejoradas ayudan a fortalecer la estructura del mortero y fortalecen una mayor resistencia a la compresión.

Por otra parte, en lo que concierne al uso de fibras tratadas es posible afirmar que estas pueden mejorar la distribución de las cargas y reducir la concentración de tensiones, lo que contribuye a una mayor resistencia general del mortero. En resumen, la muestra que contiene cemento, arena y fibra tratada muestra la mayor resistencia a la compresión, a los 28 días.

## Referencias

1. Ghavami K. Cement composites reinforced with bamboo and vegetable fibers. En: Proceedings First International Conference on Concrete and Development C and D 1. 2001; 445-461.
2. Becerra J. Viabilidad del uso de fibra del pseudotallo de plátano combinado con PET y mortero para la construcción de prototipos de tanques para almacenamiento de agua. 2022.
3. Instituto Colombiano Agropecuario. Los cultivos de plátano de Córdoba una prioridad para el ICA [Internet]. Bogotá: ICA; [fecha desconocida]. Disponible en: <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-cultivos-platano-cordoba-prioridad>.
4. Statista. Global cement production volume [Internet]. Statista; [fecha desconocida]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>.
5. Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Producción de cemento en Colombia [Internet]. Bogotá: DANE; 2023. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris#:~:text=En%20junio%20de%202023%2C%20la,al%20mismo%20mes%20de%202022>
6. Vatopoulos K, Tzimas E. Assessment of CO2 capture technologies in cement manufacturing process. J Clean Prod. 2012; 32:251-61.
7. Arias J, Covinos M. Diseño y metodología de la investigación. 2021.
8. ASTM C1157/C1157M-20. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. West Conshohocken: ASTM International; 2020.

9. Terpáková E, Kidalová L, Estoková A, Cigasová J, Stevulová N. Chemical modification of hemp shives and their characterization. *Procedia Eng.* 2012;42:931-41
10. Ghavami, Khosrow. (2001). Cement composites reinforced with bamboo and vegetable fibers. *Proceedings First International Conference on Concrete and Development C and D 1.* 445-461.
11. Becerra, J. (2022). Viabilidad del uso de fibra del pseudotallo de plátano combinado con PET y mortero para la construcción de prototipos de tanques para almacenamiento de agua
12. Instituto Colombiano Agropecuario. Los cultivos de plátano de Córdoba una prioridad para el ICA. <https://www.ica.gov.co/noticias/ica-cultivos-platano-cordoba-prioridad>
13. Statista. Global cement production volumen. <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>
14. DANE. Producción de Cemento en Colombia. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris#:~:text=En%20junio%20de%202023%2C%20la,al%20mismo%20mes%20de%202022.>
15. K. Vatopoulos, E. Tzimas. Assessment of CO2 capture technologies in cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 32 (2012), pp. 251-261.
16. Arias, J., Covinos, M. (2021). Diseño y metodología de la investigación.
17. ASTM C1157/C1157M-20.
18. Terpáková, E.; Kidalová, L.; Estoková, A.; Cigasová, J. y Stevulová, N. (2012). Chemical modification of hemp shives and their characterization. *Procedia Engineering*, 42, 931-941.



# Propiedades termoacústicas en diferentes ecomateriales

Luisa María Pérez Cogollo\*  
Maria Claudia Reyes Portillo\*  
Andrea Niampira Daza\*\*

---

\* Estudiante de pregrado, Arquitectura,  
luisa.perezc@upb.edu.co; mariac.reyes@upb.edu.co

\*\* Arquitecta PhD, docente Arquitectura, Grupo GICA, Universidad Pontificia Bolivariana,  
york.niampira@upb.edu.co

## Resumen

Esta investigación se centra en el estudio de distintos ecomateriales que pueden utilizarse en la construcción: fibra de coco (*Cocos Nucifera*), denim (residuo de textiles), celulosa (material de origen vegetal), bambú (*Guadua Angustifolia Kunth*) y fique (*Furcraea Macrophylla*), comparados con el material de fibra de vidrio; esto como propuesta de solución para los proyectos arquitectónicos que requieren sus propiedades termoacústicas y bajo impacto ambiental en su extracción, fabricación y disposición final. Los ecomateriales han tenido un auge exponencial dentro de los últimos años, como aporte a soluciones de bajo impacto ambiental en el sector de la construcción; debido a esto, surge la importancia de clasificar y reconocer las propiedades físicas y capacidades de distintas materialidades, de manera que se puedan implementar las diferentes opciones en el proceso de diseño y construcción de un proyecto arquitectónico. En relación con esto, se busca conocer los conceptos claves relacionados a la temática propuesta, así como comparar las características de los ecomateriales escogidos y determinar cuál de estos posee mejores propiedades termoacústicas. Para ello se plantea una metodología de tipo descriptiva de enfoque mixto y basada en la consulta de trabajos publicados por varios autores, además del análisis comparativo de las características y propiedades de los materiales propuestos, indicando las propiedades a estudiar para determinar su rendimiento. De esta manera, se revisaron los valores de porosidad, densidad, espesor, conductividad térmica y coeficiente de absorción sonora obtenida por otros autores. A partir de esto y el posterior análisis de la información, se pudo hallar que los materiales seleccionados para este estudio pueden definirse como ecológicos, ya que son de bajo impacto ambiental en su fabricación y disposición final, al tiempo que ofrecen altas capacidades aislantes y absorbentes al sonido, esto de forma competitiva frente a los materiales convencionales usados para el aislamiento termoacústico en la construcción de edificaciones.

**Palabras clave:** fibras naturales, aislante, acústica, residuos, materiales constructivos.



## Abstract

The research focus in the study of different eco-materials that can be used in construction: Coconut Fiber (*Cocos Nucifera*), Denim (*textile waste*), Cellulose (*vegetal origin material*), Bamboo (*Angustifolia Kunth*) and Fique (*Furcraea Macrophylla*), in contrast to Fiberglass material; as a solution in building projects considering their thermo-acoustic properties and its opportunities of low environment impact in extraction, fabrication and final disposal. Eco-materials have had an exponential growth in recent years as a contribution to low environmental impact solutions in the building segment; due to this, the importance of classifying and recognizing the physical properties and capabilities of different materials arises, so that different options can be implemented in the design and construction process of an architectural project. In relation to this, the aim is to verify the key concepts related to the proposed theme, as well as compare the characteristics of the chosen eco-materials and determine which of these have better thermoacoustic properties. For this purpose, a descriptive methodology of qualitative and quantitative approach is proposed based on the consultation of papers published by several authors and the comparative analysis of the characteristics and properties of the proposed materials indicating the properties to be studied to determine their performance. In this way, the values of porosity, density, thickness, thermal conductivity and sound absorption coefficient obtained by other authors were reviewed. From this and the subsequent analysis of the information, it could be found that the materials selected for this study can be defined as ecological, since they are low environmental impact in their manufacture and final disposition, while offering high sound-absorbing and insulating capabilities, this competitively compared to conventional materials used for thermoacoustic insulation in the construction of buildings.

**Keywords:** Natural Fibers, Insulator, Acoustic Waste, Building Materials.

## I. Introducción

Los ecomateriales son productos naturales y saludables que reducen el impacto negativo en el medio ambiente durante su vida útil. Se usan para construir edificios con criterios de bioconstrucción, empleando materiales locales, de bajo costo y consumo energético. Los ecomateriales deben cumplir con requisitos de calidad técnica y ambiental, y favorecer el reciclaje y la producción limpia<sup>1</sup>.

Teniendo en cuenta lo anterior, para que un material de construcción sea considerado como ecomaterial, debe cumplir con ciertas condiciones: que se utilicen recursos y materia prima local, que tenga bajo consumo energético en su transformación, que no contamine y sea de fácil mantenimiento, de bajo costo y baja conductividad térmica, que no produzcan daños o enfermedades en sus procesos de producción o uso y que sea de fácil producción, entre otros<sup>2</sup>.

Por otro lado, el aislamiento termoacústico de los materiales depende de varios factores físicos que varían según el lugar y el clima. Algunos de estos factores son: la densidad, la porosidad, el espesor, la conductividad y la rigidez dinámica. Estos determinan la capacidad de los materiales para reducir el ruido<sup>3</sup>. Por ello, se destacan las características mencionadas como factor relevante que afecta directamente el comportamiento de las muestras de los materiales, en este caso, la alta porosidad y densidad, de acuerdo con el espesor de la muestra utilizada y son determinantes para conseguir una baja conductividad térmica y un alto coeficiente de absorción sonora, lo que demuestra la eficiencia de la capacidad aislante de los materiales estudiados que se relacionan a continuación.

La fibra de coco (*Cocos Nucifera*) es un material fuerte y versátil que se usa en diferentes productos y obras civiles. Tiene propiedades de resistencia, durabilidad, adaptación y ayuda a reducir el ruido. Por eso, la fibra de coco es un buen material para los aislantes termoacústicos.

El denim es un tejido de algodón que se usa para confeccionar prendas de vestir; sin embargo, su producción y consumo masivo generan problemas ambientales, como la contaminación del suelo y el agua por los tintes y los residuos textiles<sup>4</sup>. El fique (*Furcraea Macrophylla*) es una planta con hojas largas y anchas, de las que se obtiene una fibra resistente y flexible. Esta fibra tiene propiedades como durabilidad, resistencia al agua salada y al calor, y capacidad de absorción de agua. El fique se usa para hacer diversos productos textiles y ecológicos<sup>4</sup>.



Las fibras de vidrio son ampliamente conocidas en el campo de la construcción por su adecuado comportamiento como aislante térmico, así como también se resalta su excelente capacidad para absorber sonidos. Estas cualidades pueden desempeñarse de manera independiente o formar parte conjunta de diseños más complejos<sup>5</sup>.

Ahora bien, ¿qué ventajas ofrecen los ecomateriales como aislantes termoacústicos?

El objetivo de esta investigación es analizar distintas fibras naturales obtenidas de residuos vegetales y textiles que puedan implementarse en la elaboración de materiales de construcción, identificando sus propiedades físico-mecánicas y efectividad termoacústica, al igual que, el nivel de impacto ambiental en comparación con otros materiales aislantes convencionales.

El interés por este asunto surge a partir de la necesidad de implementar materiales ecosostenibles en la construcción, como método de reducción del impacto ambiental y de la huella de carbono que este sector genera, de forma que se amplíe el espectro de información sobre los materiales y las ventajas o desventajas que estos ofrecen y, asimismo, ser una ayuda en la toma de decisiones, de acuerdo con la necesidad del contexto.

## 2. Métodos

La metodología descriptiva se desarrolló en tres etapas:

- Análisis de los materiales, previa identificación de su característica como ecológico, por la manera cómo se da su extracción y disposición final (recurso renovable y biodegradable o reciclable).
- Revisión de publicaciones realizadas por varios autores sobre las propiedades termoacústicas de los materiales seleccionados y los respectivos valores tomados de la documentación consultada, que incluye trabajos de investigación, trabajos de tesis, publicaciones de revistas y libros especializados.
- Clasificación de datos mediante la realización de un cuadro de características y gráficas con los valores numéricos tomados de las publicaciones consultadas, para visualizar cuáles materiales cuentan con mejores cualidades.

## 3. Resultados y discusiones

### 3.1 Identificación y caracterización de las fibras

#### Fibra de fique

Es una fibra vegetal de alta dureza, es duradera, flexible y se obtiene a partir de sus hojas. Algunas de las características físicas del material son: diámetro de la fibra: 0,15 y 0,30 mm; espesor: 2,5 cm; densidad: 80 kg/m<sup>3</sup>; resistencia térmica: 220 °C; porosidad: 80,7%<sup>6</sup>.

#### Fibra de guadua

Pertenece a la familia de las gramíneas y se encuentra, principalmente, en climas cálidos y húmedos. Algunas de sus características físicas son: espesor: 2,5 cm; densidad: 9,6 kg/m<sup>3</sup>; humedad de la fibra: 8%<sup>7</sup>.

#### Fibra de coco

La fibra se obtiene mediante la extracción de la hebra (mesocarpio) que esta recubierta por la cáscara del coco. Es biodegradable, duradera, renovable, reutilizable, inodora e imputrescible. Dentro de sus características físicas están el diámetro de la fibra: 0,18 y 0,36 mm; absorción de agua: 62%; espesor: 2,5 cm; densidad: 80 kg/m<sup>3</sup>; resistencia térmica: 240 °C; porosidad: 87-89%<sup>4</sup>.

#### Celulosa

Su composición puede ser de papel, periódico reciclado, fibras textiles o cartón. No emite vapores tóxicos, es inodoro, sensible a la humedad, no inflamable. De sus características físicas se tienen en cuenta el espesor: 10 cm; densidad: 24 kg/m<sup>3</sup>; resistividad al fuego: Euroclase B (alta)<sup>8</sup>.

#### Fibra de denim







Tejido de fibras naturales de algodón de origen vegetal, se obtiene a partir de los pantalones desechados por la comunidad. Se destacan su durabilidad y resistencia. El diámetro de la fibra es de entre 0,01 y 0,03 mm; espesor: 2,5 cm; densidad: 80 kg/m<sup>3</sup>; porosidad: 91,85%<sup>4</sup>.



## Fibra de Vidrio

Material fibroso que se obtiene al hacer fluir vidrio fundido. Sus características físicas son: diámetro de la fibra de 1  $\mu\text{m}$ ; espesor: 2,4 cm; densidad: 37  $\text{kg}/\text{m}^3$ <sup>5</sup>.

**Tabla 1.** Cuadro comparativo de propiedades termoacústicas

Propiedades térmicas y acústicas						
Referencia	Propiedad/ material	Espesor (cm)	Densidad (Kg/m3)	Porosidad (%)	Conduct. térmica (W/mxK)	Coefficiente de absorción sonora
 (Navacerrada, y otros, 2021)	<b>Figue</b> (Furcraea Macrophylla)	2,5	80	80,7	0,039	0,19
(Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. 2021)						
 Santalla, L. (2012). Fibras de Celulosa	<b>Celulosa</b> Material de origen vegetal	10	24	-	0,039	0,48
Beaumier, J.-L. (2001) Beaumier, J.-L. (2001)						
 DFM Directorio Forestal Maderero. (2017).	<b>Guadua</b> (Guadua angustifolia kunth)	2,5	9,6	-	0,15	0,18
(Páez Soto, 2016)						
 (Navacerrada, y otros, 2021)	<b>Coco</b> (Cocos Nucifera)	2,5	80	87	0,041	0,21
(Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. 2021)						
 (Navacerrada, y otros, 2021)	<b>Denim</b> Residuo de textiles	2,5	80	91,85	0,038	0,08
(Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. 2021)						
 <a href="https://serveiastacio.com/ca/tejido-de-fibra-de-vidrio.html">https://serveiastacio.com/ca/tejido-de-fibra-de-vidrio.html</a>	<b>Fibra de vidrio</b>	2,4	37	-	0,04	0,12
(Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. 2021)						

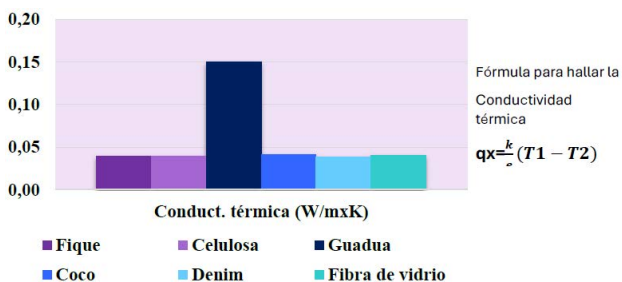
Fuente: elaboración propia, a partir de fuentes referenciadas en cada ítem.

**Tabla 2.** Cuadro comparativo de coeficiente de absorción acústica en diferentes frecuencias

Material/ Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción acústica					
	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
<b>Fique</b> (Furcraea Macrophylla)	0,19	0,12	0,29	0,46	0,85	0,87
<b>Celulosa</b> (Material de origen vegetal)	0,48	0,88	1,08	1,03	1,01	1,13
<b>Guadua</b> (Guadua angustifolia kunth)	0,3	0,35	0,36	0,39	0,42	0,56
<b>Coco</b> (Cocos Nucifera)	0,21	0,15	0,31	0,4	0,77	0,82
<b>Denim</b> (Residuo de textiles)	0,08	0,06	0,26	0,71	0,96	0,96
<b>Fibra de vidrio</b>	0,38	0,76	0,96	0,93	0,96	1,04

Valores tomados de fuentes consultadas en Tabla 1 - Coeficiente de absorción sonora\*

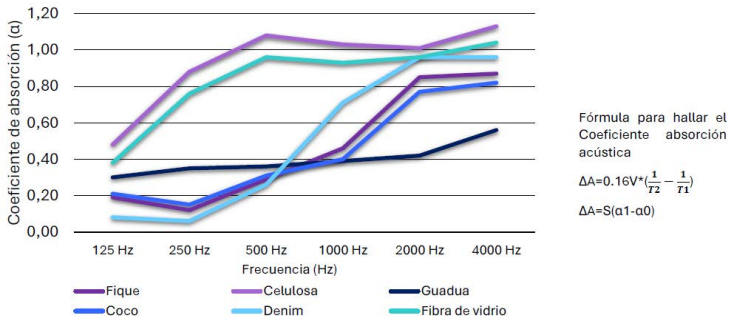
Fuente: elaboración propia, a partir de fuentes referenciadas en Tabla 1.

**Figura 1.** Propiedades térmicas de los ecomateriales analizados.

Fuente: elaboración propia, a partir de la Tabla 1.



**Figura 2.** Valores de absorción acústica de los ecomateriales analizados.



Fuente: elaboración propia, a partir de la Tabla 2.

## 4. Conclusiones

Como conclusiones parciales de esta investigación que se encuentra en curso, se puede afirmar que los 5 ecomateriales estudiados cumplen con los criterios necesarios para ser considerados como aislantes de alta calidad. En comparación con la fibra de vidrio (material sintético utilizado de referencia), los ecomateriales presentan mejor rendimiento y beneficios adicionales, como la disminución del impacto ambiental.

Se puede afirmar que el denim tiene mejores propiedades termoacústicas, pues es el material con menor conductividad térmica y, por lo tanto, mejor aislante; así mismo, presenta un alto coeficiente de absorción sonora a altas frecuencias, lo que lo convierte en el material con mejor comportamiento como aislante acústico.

Teniendo en cuenta estos resultados, se puede afirmar que los ecomateriales pueden ser una alternativa viable y efectiva para su utilización y prometen ser una oportunidad para reducir la huella ambiental y mejorar el confort termoacústico en las edificaciones.

## Referencias

1. American Association of State Highway and Transportation Officials,. (2004). AASHTO, T. 324-04. Standard test method for hamburg wheel track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA). Washington DC.
2. Beaumier, J.-L. (2001). L'isolation phonique écologique. Rhone-Alpes, Francia: Terre Vivante.
3. Cerámica Italia S.A. (s.f.). Cerámica Italia. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.ceramicaitalia.com/corporativo/quienessomos.php>
4. ChovA. (s.f). Manual de aislamiento acústico en la edificación. Valencia, España: ChovA. Obtenido de <https://chova.com/documentacion/catalogos/Manual%20Aislamiento%20Ac%C3%BAstico%202021.pdf>
5. Departamento Nacional de Planeación. (2003). cerámica. Recuperado el 01 de 10 de 2023, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/desarrollo%20empresarial/ceramica.pdf>
6. Gimenez de Paz, J. C. (1990). Lana de vidrio como material acústico: Modelo predictivo. Lana de vidrio como material acústico: Modelo predictivo , 83-86 . Argentina. Obtenido de <http://boletines.secv.es/upload/199029083.pdf>
7. González Espinosa, L. A. (2010). Diseño de paredes con ecomateriales para edificaciones de la Costa Ecuatoriana. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10895>
8. Karacasu, K. &. (2017). Use of Ceramic Wastes in Road Pavement Design. Conference: Proceedings of the World Congress on New Technologies(226), 1-6.
9. Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (Marzo de 2021). Comportamiento acústico y térmico de materiales basados en fibras naturales para la eficiencia energética en edificación. Informes de la Construcción, 73(561): e373. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/350318913\\_Comportamiento\\_acustico\\_y\\_termico\\_de\\_materiales\\_basados\\_en\\_fibras\\_naturales\\_para\\_la\\_eficiencia\\_energetica\\_en\\_edificacion](https://www.researchgate.net/publication/350318913_Comportamiento_acustico_y_termico_de_materiales_basados_en_fibras_naturales_para_la_eficiencia_energetica_en_edificacion)
10. Navacerrada, M., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (2019). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. El Sevier, 4-8. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X19309107?via%3Dihub>
11. Nyugen, X., Honda, T., Wang, Y., & Yamamoto, R. (2010). Eco-materials, Module-H. Eco-materials, Module-H. Tokio, Japón: Universidad de Tokio. Obtenido de <http://www.jcdiehl.nl/d4s-sbs/MH.pdf>
12. Officials, A. A. (2004). AASHTO T324 Standard test method for hamburg wheel track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA). Recuperado el 25 de 08 de 2023



13. Páez Soto, D. A. (2016). Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua. Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58271#:~:text=El%20objetivo%20general%20de%20esta%20investigaci%C3%B3n%2C%20fue%20el,12%20muestras%20de%204%E2%80%9Dde%20di%C3%A1metro%20y%2-01%E2%80%9Dde%20espesor.>
14. Rondón Quintana, H. A. (2015). Pavimentos: materiales, construcción y diseño. Bogotá: Macro EIRL.
15. Silvestre, R. M. (2013). Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials*, 115-122.
16. Solarte, N. (2022). Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltico modificada con añadido de residuos triturados de la industria cerámica. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
17. Unidas, N. (s.f.). sustainabledevelopment. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
18. Veá Folch, S. R. (2013). Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente. III(8), 27-38. Obtenido de [https://asefma.es/wp-content/uploads/2014/02/asfalto\\_08.pdf](https://asefma.es/wp-content/uploads/2014/02/asfalto_08.pdf)
19. Vías, I. N. (2013). Normas de ensayo de materiales para carreteras. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.invias.gov.co/>
20. Vías, I. N. (2022). Especificaciones generales de construcción de carreteras. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.invias.gov.co/>

# Clasificador automático para la detección de carga empleando señales cinéticas de marcha

María Alejandra Muñoz Nieves\*  
Daniel Fernando Russo Ortiz\*  
Santiago Pérez Rodríguez\*  
Julián Daniel Zabaleta Piñarte\*  
Silvia Alejandra Sotelo López\*\*

---

\* Estudiante, Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana; mariaa.munoz.2021@upb.edu.co; daniel.russo.2021@upb.edu.co; santiago.perezr.2021@upb.edu.co; julian.zabaleta.2021@upb.edu.co.

\*\* Docente, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Pontificia Bolivariana; silvia.sotelo@upb.edu.co.



## Resumen

La detección de sobrecarga es un campo importante en el ámbito de la salud ocupacional, ya que los excesos de carga pueden causar lesiones graves en el cuerpo humano. Por lo tanto, si se tiene en cuenta que el peso adicional es un causante de las lesiones laborales, es esencial identificar cuando un trabajador experimenta una carga extra en alguna parte del cuerpo, con el fin de mejorar su bienestar y prevenir posibles lesiones a futuro. En este contexto, la presente investigación busca clasificar de forma automática la marcha de personas con carga localizada en su cintura y las que no la tienen. Para esto, se realizó un experimento con algunos estudiantes de la comunidad universitaria de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) del cual se adquirieron señales de aceleración en los diferentes ejes x, y, z a través del acelerómetro de un dispositivo móvil, en dos contextos: con una carga de 3.0 kg localizada en la cintura y sin dicha carga. Luego, se realizó una búsqueda para la arquitectura de una red neuronal con el mejor desempeño para identificar una sobrecarga. En primer lugar, durante el preprocesamiento se extrajeron 33 características en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Seguidamente, se procedió a dividir la base de datos, 74% para el entrenamiento y 26% para la prueba. La arquitectura obtenida está dada por tres capas densas con 80, 20 y 10 neuronas, y finaliza con una capa de dos neuronas. Del entrenamiento, se obtuvo una exactitud del 91.9% y un valor F de 0.91; mientras que, en la prueba, se obtuvo una exactitud del 44.48% y un valor F de 0.53 y 0.33 para la clase "con carga" y "sin carga", respectivamente. Estos resultados muestran una alternativa para el control automático de la carga manipulada por trabajadores, mediante la integración de señales cinéticas y redes neuronales.

**Palabras clave:** seguridad laboral, cargas localizadas, redes neuronales.

## Abstract

Overload detection is an important field in the field of occupational health, since excess loads can cause serious injuries to the human body. Therefore, identifying whether a worker experiences additional localized loading in any part of the body is essential to prevent work-related injuries and improve well-being. In this context, the present research seeks to automatically classify the gait of people with a load located on their waist and those without. For this, an experiment was carried out with students from the UPB community where acceleration signals were acquired in the different x, y, and z axes through the accelerometer of a mobile device, in two contexts: with a load of 3.0 kg located on the waist and without load. A search was performed for the architecture of a neural network with the best performance to identify an overload. First, 33 time and frequency domain features were extracted during preprocessing. Next, the database was divided, 74% for training and 26% for testing. The architecture obtained is given by three dense layers with 80, 20 and 10 neurons, ending with a layer of two neurons. From the training, an accuracy of 91.9% and an F value of 0.91 were obtained; While, in the test, an accuracy of 44.48% and an F value of 0.53 and 0.33 were obtained for the "with load" and "without load" class, respectively. These results show an alternative for the automatic control of the load handled by workers through the integration of kinetic signals and neural networks.

**Keywords:** Occupational Safety, Localized Charges, Neural Networks.

## I. Introducción

En Colombia, la sobrecarga biomecánica es un problema importante en los lugares de trabajo. Según datos del Ministerio de Trabajo, en 2020 se reportaron más de 24.000 accidentes laborales relacionados con la manipulación manual de cargas, lo que representa el 20% de todos los accidentes laborales en el país. Además, en 2019 se registraron más de 80.000 casos de trastornos musculo esqueléticos relacionados con el trabajo, lo que representa el 45% de todas las enfermedades laborales en Colombia<sup>1</sup>. Esta sobrecarga puede aumentar el riesgo de lesiones y trastornos musculo esqueléticos<sup>2</sup>, lo que puede tener un impacto significativo en la salud y el bienestar de los trabajadores y en la productividad de las empresas<sup>3</sup>. Por lo tanto, es importante desarrollar métodos precisos y confiables para detectar y monitorear la carga durante la realización de estas actividades.

En ese sentido, el monitoreo remoto es un procedimiento que permite supervisar y controlar dispositivos, sistemas y procesos desde otro lugar. En el campo de la salud, el monitoreo remoto permite a los profesionales de la salud tener la posibilidad de supervisar a los pacientes sin la necesidad de que estén presentes en un hospital o clínica. Esto es especialmente útil para las personas que viven en áreas alejadas o que tiene dificultades para trasladarse. Los dispositivos de monitoreo remoto no solamente tienen la capacidad de medir indicadores vitales, sino que también poseen diversos sensores para otros objetivos, tales como medir la vibración o la aceleración del movimiento de una estructura, por medio de un acelerómetro. Estos datos se transmiten a través de internet a un centro de monitoreo donde los profesionales de la salud puedan analizarlos y tomar decisiones<sup>4</sup>. El monitoreo remoto ofrece una solución para brindar atención a distancia a personas que padecen afecciones crónicas, demencia o que tienen alto riesgo de sufrir caídas, porque esto les permite vivir en sus propios hogares bajo observación remota. Esta técnica se enfoca en actuar ante eventos de emergencia y generar una respuesta rápida y una ayuda efectiva<sup>5</sup>.

En particular, el monitoreo remoto para la detección automática de carga (que utiliza señales cinéticas de marcha) es un área de investigación activa que tiene el potencial de ayudar a prevenir lesiones relacionadas con la sobrecarga y mejorar la eficiencia del trabajo. Al proporcionar información en tiempo real sobre la carga que se está manejando, se pueden identificar tareas que presenten un mayor riesgo de lesiones y tomar medidas para reducir dicho peligro. Además, la detección automática de carga también puede mejorar la precisión y la eficacia de la evaluación ergonómica en entornos laborales, lo que puede conducir a una mayor satisfacción laboral y a una reducción de los costos relacionados con la salud laboral<sup>6</sup>.



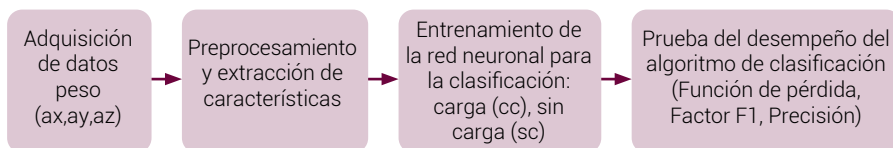
La detección automática de carga mediante señales cinéticas de marcha se basa en la medición de las señales cinéticas generadas por la marcha del usuario<sup>7</sup>, utilizando sensores vestibulares, como acelerómetros, giroscopios y magnetómetros. Estas señales son empleadas en algoritmos de aprendizaje automático, lo cual permite determinar la existencia de una carga que está siendo transportada. La capacidad de medir dicha carga tiene importantes implicaciones en áreas como la prevención de lesiones, la rehabilitación y el diseño de equipos de transporte y carga. La detección automática de carga mediante señales cinéticas de marcha tiene un gran potencial en una variedad de aplicaciones. Por ejemplo, puede ayudar a prevenir lesiones laborales y desarrollar programas de rehabilitación efectivos para pacientes que han sufrido lesiones en la espalda u otras partes del cuerpo.

Basados en lo anterior, en este trabajo se propone un detector de carga basado en redes neuronales, que sea capaz de clasificar individuos que tienen cargas adicionales sobre su cuerpo, mediante una base de datos de aceleración en los ejes x, y, z de la marcha. En este caso en el que la investigación está en curso, las mediciones se tomarán de los estudiantes de la comunidad universitaria UPB que participan en el proyecto. Para ello, se destaca el uso de la plataforma *Edge Impulse*<sup>8</sup>, la cual permite crear, entrenar y desplegar modelos de aprendizaje automático en dispositivos integrados, como microcontroladores, sensores y otros dispositivos IOT (Internet de las cosas).

## 2. Metodología

Para el desarrollo del proyecto se siguió la metodología presentada en el diagrama de bloques de la Figura 1.

Figura 1. Metodología.

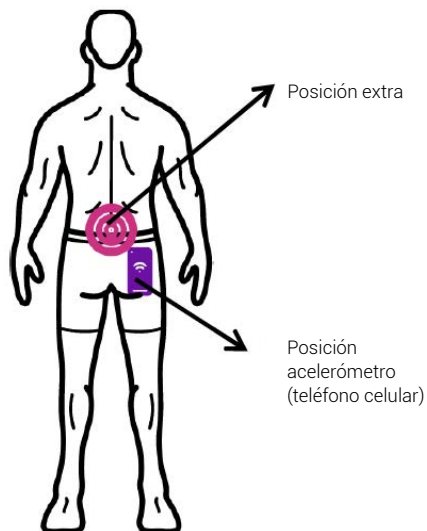


## 2.1 Base de datos

Para la recolección de los datos se contó con la participación de 20 estudiantes de la UPB, seccional Bucaramanga. El 50% de ellos eran hombres y el otro 50% mujeres, con edades entre los 18 y 24 años. Todos ellos autorizaron el tratamiento de sus datos por medio de un consentimiento informado. El experimento consistió en caminar en línea recta a lo largo de un pasillo de 40 m, durante 3 minutos, en dos situaciones: la primera sin carga y la segunda con una carga de 3 kg ubicada en la parte inferior de la espalda (Figura 2). Al inicio del experimento se ubicó un dispositivo móvil en el bolsillo delantero del pantalón. Se empleó un acelerómetro TDK- Invensense icm4x6xx (Moto G 30 y Moto G 22) con una frecuencia de muestreo de 62.5 Hz.

Al activar el acelerómetro, cada participante aguardaba 10 segundos antes de iniciar la caminata; al cambiar la dirección de su movimiento, posterior al giro, se esperaban 5 segundos antes de continuar la marcha. Se registraron señales de aceleración en los tres ejes espaciales x, y, z. Estas señales temporales fueron almacenadas en la base de datos de un proyecto de *Edge Impulse*. Adicionalmente, se tomaron los datos de altura (cm) y peso (kg). La base de datos se dividió en 74% para el entrenamiento y 26% para la prueba.

**Figura 2.** Disposición de teléfono móvil y carga de 3 kg.



Fuente: elaboración propia.



**Tabla 1.** Características del peso de los sujetos involucrados en el experimento

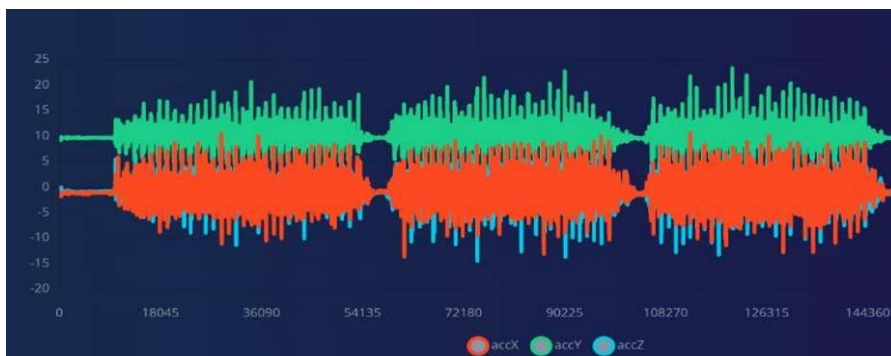
<b>Muestra</b>	<b>20</b>
Media	<b>68.5</b>
Desviación Estándar	<b>19.6</b>
Coefficiente de variación	<b>28.6</b>
Mínimo	<b>46.9</b>
Máximo	<b>130</b>
Asimetría	<b>1.70</b>
Curtosis	<b>4.15</b>

En la Tabla 1 se presentan las estadísticas en relación con el peso de los participantes, y se destaca una media de 68.5 kg y una desviación estándar de 19.6 kg, con un mínimo de 46.1 de kg y un máximo de 130 kg.

## 2.2 Preprocesamiento

La etapa de preprocesamiento se dividió en dos etapas. Primero, se tomaron las 60 señales originales de aceleración (3 señales por individuo). En la Figura 3 se observan las señales de aceleración en el eje X (naranja), Y (verde) y en Z (azul) donde se identifican estados de pausa y giro.

**Figura 3.** Señales de aceleración obtenidas en experimento de marcha<sup>9</sup>.



Se dividió la base de datos en 74% para el entrenamiento (20% del conjunto de entrenamiento se empleó en la validación) y 26% para la prueba.

Para la extracción de características de entrada de la red neuronal, se removió la media de las señales y se obtuvieron 3 características estadísticas en el espacio del tiempo por cada eje, tales como *Root Mean Square* (RMS), asimetría y curtosis, para cada una de las señales. Posteriormente, se realizó un análisis espectral para remover las frecuencias indeseadas, lo cual se logró empleando el filtro *Butterworth*, que pasa altas de orden 6 con una frecuencia de corte de 3.0 Hz. Por último, se aplicó la Transformada Rápida de Fourier (TRF) para la extracción del espectro de potencia de las señales, con una longitud de 16 muestras. De aquí se obtuvieron las características espectrales, a partir del máximo valor encontrado en las ventanas establecidas para la TRF (24 características).

## 2.3 Entrenamiento

Una vez extraídas las características de las señales de aceleración, se empezó a configurar la arquitectura de la red neuronal, empleando las librerías *Tensor Flow* y el módulo de clasificación de Keras.

## 2.4 Métricas

Se emplearon la exactitud  $A$  y el valor-  $F1$  para evaluar y comparar los algoritmos de detección, expresados a partir de:

$$A = \frac{VP + VN}{VN + VP + FP + FN}$$
$$F = \frac{2VP}{2VP + FP + FN}$$

Luego, se realizó un *Search Grid* para encontrar la arquitectura de la red neuronal con mejor desempeño en la clasificación binaria. Para esto, se evaluaron diferentes configuraciones del número de capas ocultas, neuronas en cada capa y sus funciones de activación; además del número de ciclos para el entrenamiento y la tasa de aprendizaje.



### 3. Resultados

Del preprocesamiento se obtuvieron 33 características, las cuales corresponden a las entradas de la red neuronal, tanto en el espacio del tiempo como en el de la frecuencia.

De la implementación del *Search Grid* se obtuvo una arquitectura final, definida por 100 ciclos de entrenamiento, una tasa de aprendizaje de 0.0005, tres capas de neuronas densas, una 80, 20 y 10 neuronas, cada una de ellas con una función de activación "RELU". La capa de salida consta de dos neuronas asociadas con las dos clases a tipificar, con una función de activación "SOFTMAX".

En la etapa de entrenamiento se encontró una exactitud del 91.9% y un valor F1 de 0.91. Teniendo en cuenta que la clase positiva es "con carga", la matriz de confusión obtenida condujo a un 92.1% de verdaderos positivos, un 91.5% de verdaderos negativos, un 8.5% de falsos negativos y, por último, un 7.9% de falsos positivos. En el caso de los datos de prueba, se obtuvo una exactitud de 44.48%, un 58.8% de verdaderos positivos, un 28.7% de verdaderos negativos, un 41.2% de falsos negativos, y por último un 71.3% de falsos positivos. Mientras el valor F1 obtenido para la clase con carga y sin carga corresponde a 0.53 y 0.33, respectivamente.

### 4. Conclusiones

Los resultados de esta investigación en marcha sugieren que la detección de la carga, a partir de las señales cinéticas de la marcha, es una técnica efectiva que permite monitorear posibles sobrecargas en el ámbito laboral. Mediante *Search Grid* se logró la configuración de la red neuronal entrenada con características del espacio temporal y de frecuencia con el mejor desempeño en el espacio de búsqueda, lo cual permite alcanzar una exactitud del 91.9% con los datos de entrenamiento y 44.48% con los datos de prueba. Los resultados del valor F1 de la prueba muestran que el detector predice con mayor exactitud la clase "con carga". Para futuros trabajos se recomienda ampliar la base de datos, de tal manera que incluya individuos con mayor peso y una carga extra de mayor magnitud. Además, se recomienda considerar otras características en el espacio del tiempo y la frecuencia, para evaluar su impacto en el desempeño del clasificador. Esto permitirá entrenar un detector con mayor potencialidad y mejores resultados en la detección de cargas extras.

## Referencias

1. Ministerio de trabajo, "Ministerio de Trabajo. Boletín estadístico 2020," 2020. <https://www.mintrabajo.gov.co>.
2. H. P. Mercado and W. A. Medina, "Nivel de riesgo biomecánico por manipulación manual de pacientes adultos en el área de hospitalización de una institución de salud de alta complejidad en Soledad, 2016-1," *Univ. Libr. Secc. Barranquilla*, p. 109, 2017.
3. O. M. (OMS), "Musculoskeletal health," 2021. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/musculoskeletal-conditions> (accessed Mar. 01, 2023).
4. C. E. Rose Gómez, L. M. Márquez Agúndez, J. C. Hernández Cruz, and M. T. Serna Encinas, "Sistema de monitoreo remoto y detección de anomalías cardíacas en pacientes ambulatorios," *Res. Comput. Sci.*, vol. 137, no. 1, pp. 39–49, 2017, <https://doi.org/10.13053/rcs-137-1-4>.
5. G. A. López-Orozco, J. A. Guerrero-Ibáñez, and E. Ramos-Michel, "Sistema de monitoreo remoto y evaluación de signos vitales en pacientes con enfermedades crónicas," *CISCI 2013 - Decima Segunda Conf. Iberoam. en Sist. Cibern. e Informatica, Decimo Simp. Iberoam. en Educ. Cibern. e Informatica, SIECI 2013 - Memorias*, vol. 2, no. 333, pp. 79–84, 2013.
6. A. Camacho-García, R. Linares, J. Miró, and P. Bernabeu, "Análisis de señales de acelerometría en biomecánica," pp. 53–56, 2014, [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/71740/articulo.pdf?sequence=2#:~:text=El análisis de señales de,de varios puntos de interés>.
7. J. Perry, J. M. Burnfield, and L. M. Cabico, "Gait Analysis: Normal and Pathological Function," *J. Sports Sci. Med.*, vol. 9, no. 2, p. 353, 2010, Accessed: Mar. 01, 2023. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/21414442/>.
8. Edge Impulse, "Getting Started - Edge Impulse Documentation," 2022. <https://docs.edgeimpulse.com/docs/> (accessed Mar. 01, 2023).
9. Edge Impulse, "Detección de carga - Edge Impulse Studio," 2023. <https://studio.edgeimpulse.com/studio/157833> (accessed Mar. 01, 2023).



# Optimización topológica de un chasis SSV para el Dakar

Anuar Isaac Rojas Muñoz\*  
José Luis Salgado Cordero\*  
Rafael Eduardo Tuiran Villalba\*\* \*\*\*\*  
Claudia Marcela Pérez Madrid\*\*\*

---

\* Estudiante de pregrado, Ingeniería Mecánica,  
anuar.rojas@upb.edu.co, jose.salgado@upb.edu.co,

\*\* Docente Tutor, Ingeniería Mecánica, rafael.tuiranv@upb.edu.co

\*\*\* Docente asesor, claudia.perezm@upb.edu.co

\*\*\*\* Autor para correspondencia.

## Resumen

Este trabajo se enfoca en optimizar un chasis SSV para el Rally Dakar, mediante la técnica de optimización topológica y el método QFD. Se seleccionaron, entonces, algunas características clave para diseñar un chasis basado en los modelos *Spaceframe* y monocasco utilizados en el Dakar. La optimización topológica redujo el peso del chasis en un 35% y mantuvo su resistencia y rigidez, lo que potencialmente mejora su eficiencia y reduce las emisiones de CO<sub>2</sub>. La elección de materiales reciclables y la redistribución precisa del material disminuyen el desperdicio y promueven la sostenibilidad. Esta optimización también podría prolongar la vida útil del chasis; además de que la mejora en el rendimiento del chasis puede aumentar la competitividad del vehículo. En síntesis, este estudio no solo demuestra la eficacia de la optimización topológica en el diseño de chasis SSV, sino que también subraya la importancia de la sostenibilidad y los procesos circulares en la industria automotriz. Este impacto positivo en la eficiencia y la sostenibilidad es importante, ya que los avances tecnológicos dentro del sector de alta competición se convierten, con el tiempo, en productos de mejor calidad para el público general.

**Palabras clave:** optimización topológica, chasis SSV, alto rendimiento, eficiencia estructural, reducción de peso.

## Abstract

This work focuses on optimizing an SSV chassis for the Dakar Rally using the topological optimization technique and the QFD method. Key features were selected to design a chassis based on Spaceframe and monocoque models used in the Dakar Rally. Topological optimization reduced the chassis weight by 35% while maintaining its strength and stiffness, potentially improving efficiency, and reducing emissions. The choice of recyclable materials and the precise redistribution of material reduces waste and promotes sustainability. This approach could also extend chassis life. In addition, improved chassis performance can increase competitiveness in competition. In summary, this study not only demonstrates the effectiveness of topological optimization in SSV chassis design, but also underscores the importance of sustainability and circular processes in the automotive industry. With a positive impact on efficiency and sustainability, this considering that technological advances within the high competition sector transpire over time into better quality products for the public.

**Keywords:** Topological Optimization, SSV Chassis, High Performance, Structural Efficiency, Weight Reduction.



# I. Introducción

La optimización topológica, una innovación tecnológica en el diseño de ingeniería, redefine las estructuras para mejorar su eficiencia<sup>1</sup>. Este enfoque se aplica al diseño del chasis SSV (para competiciones como las del Rally Dakar) con el objetivo de mantener las propiedades mecánicas y reducir el peso y los costos. La pregunta central en esta investigación es: ¿cómo mejorar el chasis SSV sin sacrificar su rendimiento? Mediante este proceso innovador, liderado por el semillero SIMEC de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) se buscan respuestas y se promueve la eficiencia en la industria automotriz. La relevancia de este proceso de diseño radica en la optimización compleja y el correcto uso de los materiales, al brindar soluciones más ligeras y resistentes<sup>1</sup>. Además, esta técnica se ajusta perfectamente a los principios de sostenibilidad, pues reducir el uso de materiales y los costos de producción, lo que puede conducir a una disminución en el consumo de combustible y una reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Este enfoque de vanguardia no solo impulsa la eficiencia mecánica, sino también la competitividad en las exigentes carreras del Rally Dakar, donde la tecnología y la innovación marcan la diferencia.

## 2. Métodos

### 2.1 Definición del problema y objetivos del trabajo

En un principio se planteó la idea de diseñar el chasis de un vehículo monoplace, mediante los procesos de optimización topológica y siguiendo los lineamientos normativos de la competencia Dakar y Federación Internacional de Automovilismo (FIA). Esto fue delimitando el proceso de diseño, estructurando los diseños conceptuales, siguiendo las referencias comerciales y desarrollando los diseños a detalle para que fuesen evaluadas las estructuras en condiciones de funcionamiento, por medio de simulaciones de FEM.

## **2.2 Diseño conceptual del chasis SSV utilizando la metodología QFD**

Se evaluaron, mediante un proceso de selección y discretización, las características y condiciones necesarias para el diseño y la construcción del vehículo, y con la metodología QFD (*Quality Function Deployment*) se determinó la importancia y un grupo de características que deben ser consideradas a la hora de diseñar el vehículo. Diseño, análisis estático y estudio de elementos finitos

Para la optimización topológica se verificó la viabilidad del diseño, considerando la aplicación de un sobredimensionamiento a las cargas que se efectuarían sobre la estructura, lo cual garantizaba un factor de seguridad con el que se pudiese tener un producto que cumpliera con los estándares normativos de la FIA y la reglamentación de la competencia Dakar, 2022.

## **2.3 Evaluación de los resultados obtenidos y comparación con otros modelos utilizados en el Dakar**

Se realizó una comparación para posicionar, respecto al mercado, las características del producto, mediante procesos de independencia de malla, que son cruciales para identificar la calidad de los procesos de simulación efectuados y poder realizar un comparativo de las características iniciales sugeridas para el producto en el QFD y en los resultados finales obtenidos.

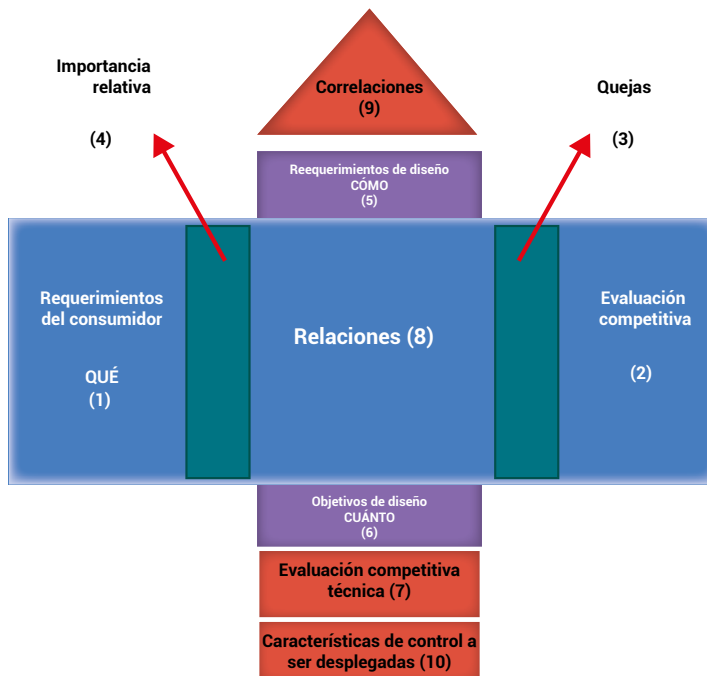
## **2.4 QFD: *Quality Function Deployment***

Es una metodología de trabajo que se utiliza para la parametrización de las características que se deben tener en cuenta a la hora de hacer un diseño conceptual de un producto o servicio. Esta metodología se basa en la identificación de las necesidades y las expectativas del cliente, las cuales se traducen en características técnicas que deben ser consideradas en el diseño del producto o servicio.

Asimismo, la Casa de la calidad (Figura 1) se representa con interrelaciones que describen las características técnicas del proceso, las necesidades del cliente, las priorizaciones y las descripciones de cada uno.



**Figura 1.** Casa de la calidad.



Fuente: Imagen tomada del blog sobre la gerencia y la gestión de la calidad total, del Prof. Andrés López A.

El objetivo principal de QFD es asegurar que el diseño del producto o servicio cumpla con las necesidades y expectativas del cliente, lo que se traduce en una mayor satisfacción del cliente y una mayor competitividad de la empresa<sup>2</sup>. En el caso del trabajo de grado presentado, se utilizó la metodología QFD para el diseño conceptual del chasis SSV en el Dakar, y se identificaron las necesidades y expectativas de los competidores, traduciéndolas en características técnicas que debían ser consideradas en el diseño del chasis.

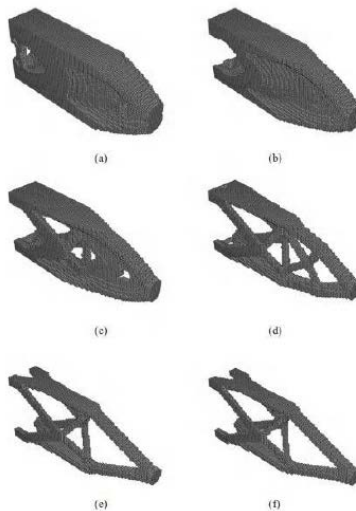
## 2.5 Comprobación experimental

### 2.5.1 Modelo BESO 3D

El método de optimización topológica BESO 3D (*Bidirectional Evolutionary Structural Optimization in 3D*) fue utilizado en el proceso de optimización del chasis SSV. Este método es una extensión del método BESO, pero en tres dimensiones, lo que permite una mayor precisión en la distribución de material.

A continuación, en la Figura 2, se presenta un modelo de experimentación con el método BESO 3D, de un voladizo en el que se efectuó una reducción de volumen del 10%.

**Figura 2.** Modelo experimenta BESO 3D voladizo.



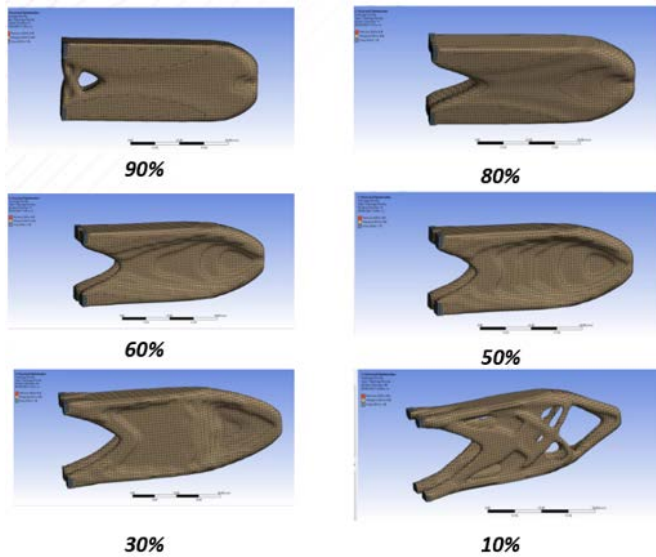
El proceso de optimización consistió en la eliminación gradual de material de la estructura, mediante la creación de agujeros o cavidades, y en la evaluación de la rigidez resultante. A continuación, se añadió material en las zonas críticas, con el fin de aumentar la rigidez y mantener la integridad estructural. Este proceso se repitió hasta que se alcanzó la distribución óptima de material. El método BESO 3D ha demostrado ser eficaz en la optimización de estructuras en diferentes campos de la ingeniería, incluyendo la aeronáutica, la automotriz y la civil.



### 2.5.2 ANSYS MAPDL

El modelo de optimización dentro de ANSYS Workbench fue mediante el solver MAPDL en su modo de interfaz visual donde se plantearon las mismas condiciones del experimento BESO 3D y se realizó un seguimiento al resultado de la optimización, para así poder plantear la metodología del proceso de optimización topológica.

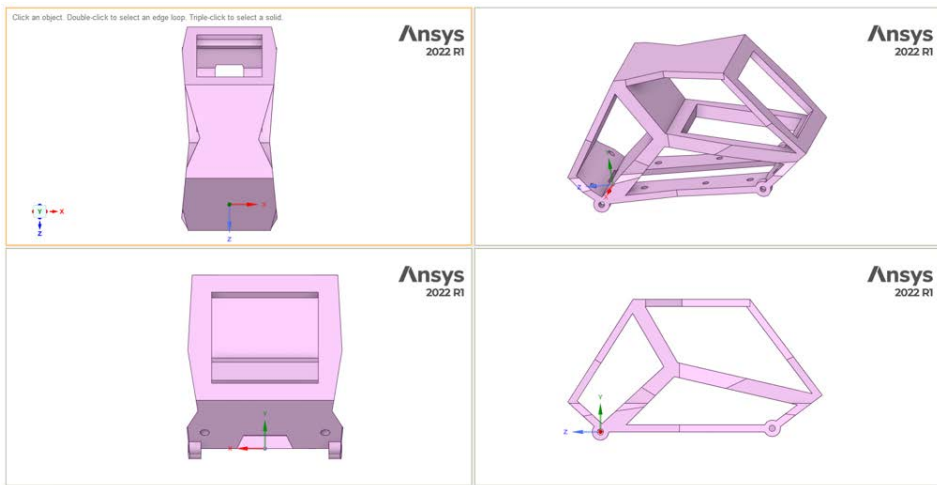
**Figura 3.** Modelo experimental evaluado en Ansys Workbench



### 2.6 Modelos planteados

- **Chasis monocasco:** este chasis es uno de los dos modelos de chasis que se consideraron en el proyecto de optimización topológica de un chasis SSV para el Dakar. Este tipo de chasis se caracteriza por tener una estructura única y continua, que integra el habitáculo del conductor y los pasajeros, así como el compartimento del motor y la suspensión.

En este tipo de chasis, la carrocería y el chasis forman una sola pieza, lo que proporciona una mayor rigidez y resistencia a la torsión, en comparación con otros tipos de chasis. La estructura del chasis monocasco tiene un diseño simple y con menos secciones estructurales, para favorecer su posible proceso de fabricación, ya fuese en estructuras laminadas para producción en masa o en fibra de carbono.

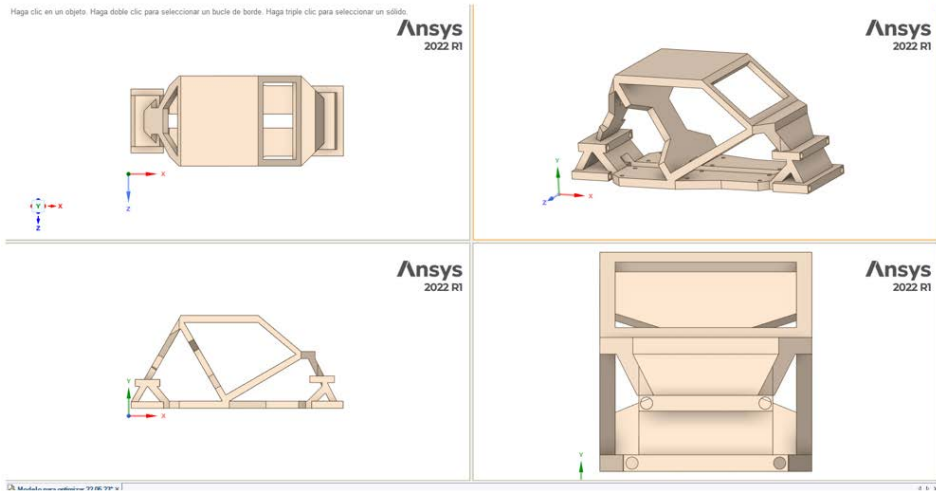


**Figura 4.** Modelo esquema chasis monocasco.

- Chasis Spaceframe:** este chasis es otro de los dos modelos de chasis que se consideraron en el proyecto de optimización topológica de un chasis SSV para el Dakar. Este tipo de chasis se caracteriza por tener una estructura reticular de tubos que se conectan entre sí, formando una especie de jaula. El objetivo de este diseño es maximizar la resistencia y rigidez del chasis, mientras se minimiza su peso. Para lograr esto, se aplican algoritmos y restricciones que redistribuyen el material y eliminan las secciones innecesarias. El resultado es una estructura reticular eficiente que mejora el rendimiento y manejo del vehículo durante las competencias de rally.



Figura 5. Modelo esquema chasis *Spaceframe*.



- **Simulaciones estáticas:** dentro de estas simulaciones se planteó ejecutar cargas dentro de los soportes de cada tipo de chasis en condiciones de torsión y, por procesos de simetría, estresar las estructuras a puntos de inflexión en los que se pudiesen encontrar fallas o rupturas dentro de situaciones que abarcaran el factor de seguridad planteado.
- **Independencia de malla:** este proceso se refiere a la capacidad de un modelo que proporcione resultados precisos y convergentes, para que, a medida que se modifican los tamaños de los elementos, se refinan las mallas o se discretice el dominio.

Este proceso es crucial como verificación de la calidad del modelo matemático utilizado en las simulaciones de análisis estático y en las optimizaciones topológicas. El objetivo del proceso de independencia de malla es asegurarse de que los resultados obtenidos no dependan del tamaño de los elementos de la malla, sino que sean consistentes y precisos independientemente de la resolución de la malla utilizada. Para lograr esto, se refinan de manera gradual los elementos de la malla y se realizan simulaciones de análisis estático y optimizaciones topológicas en cada nivel de refinamiento.

Figura 6. Simulaciones estáticas planteadas al modelo esquemático Spaceframe.

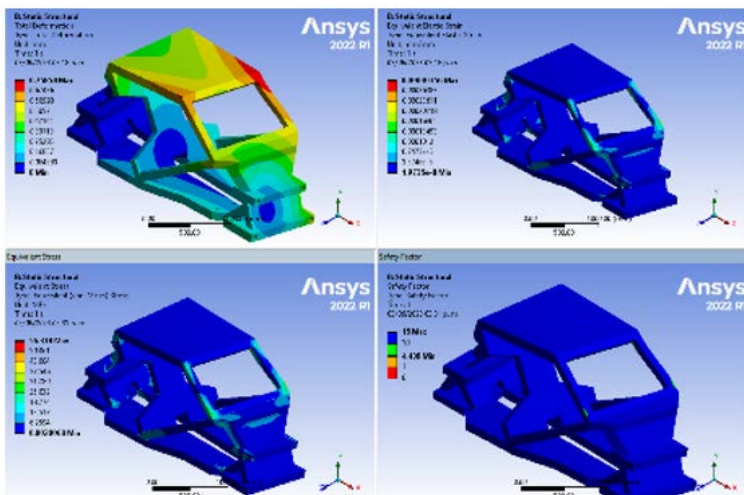
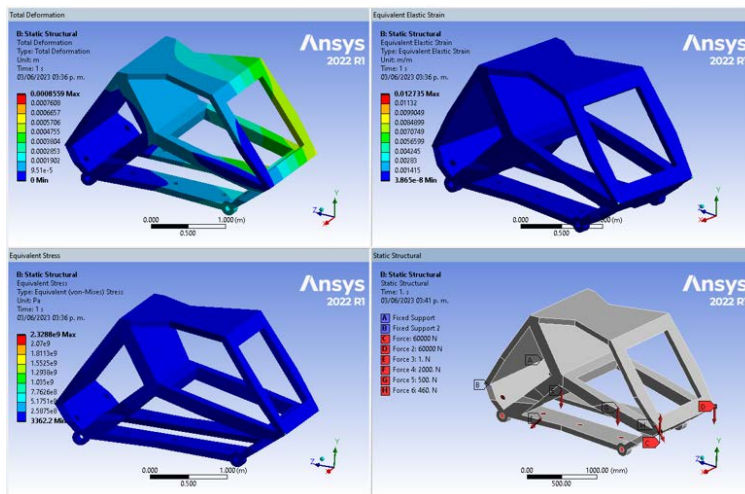


Figura 7. Simulaciones estáticas planteadas al modelo esquemático monocasco.





Si los resultados obtenidos son consistentes y convergen a un valor estable a medida que se refinan los elementos de la malla, se considera que el modelo es independiente de la malla y se pueden obtener resultados precisos y confiables con cualquier resolución de malla adecuada. El proceso de independencia de malla es una práctica común en la simulación y el análisis de ingeniería, y es esencial para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados obtenidos<sup>3</sup>.

### 3. Resultados y discusiones

En el proceso de optimización topológica se realizó un postproceso con diversos *softwares*, como Ntopology y Blender, con los que, por métodos de interpolación y reconocimiento de mallas, se logró llegar a estos resultados estructurales.

Luego se procedió a realizar las respectivas simulaciones dinámicas y estáticas para comprobar la resistencia del producto, las cuales se realizan siguiendo la normativa IHHS en la normativa *Crash Test Protocol Version IX*. Estas simulaciones consistieron en movilizar un cuerpo con la estructura de una barrera deformable de 1500 kg a una velocidad de 50 km/h paralelamente a la estructura del vehículo y así identificar las deformaciones del chasis en los impactos. También se realizaron simulaciones de impactos frontales del vehículo. Se midieron las deformaciones del vehículo por los impactos para evaluar su resistencia y rigidez estructural. Estas simulaciones son importantes para garantizar la seguridad del conductor y los pasajeros en caso de accidentes.

**Figura 8.** Modelo optimizado y postprocesado de chasis monocasco y chasis Spaceframe.

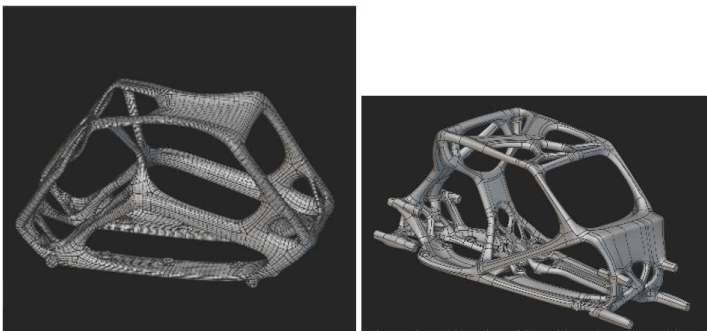


Figura 9. Impactos frontales en chasis monocasco.

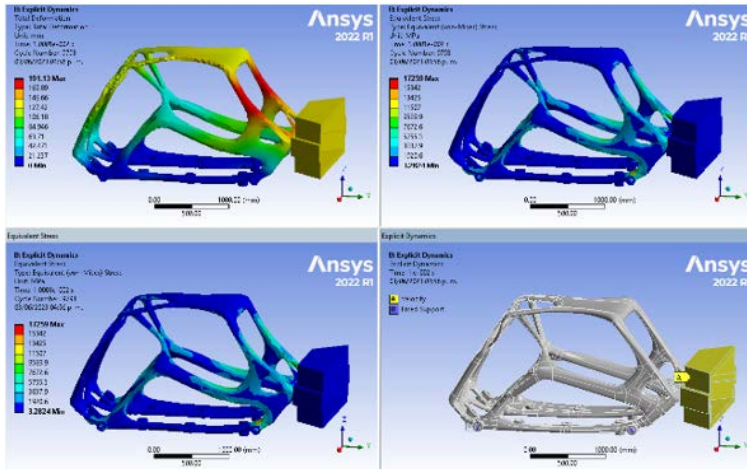
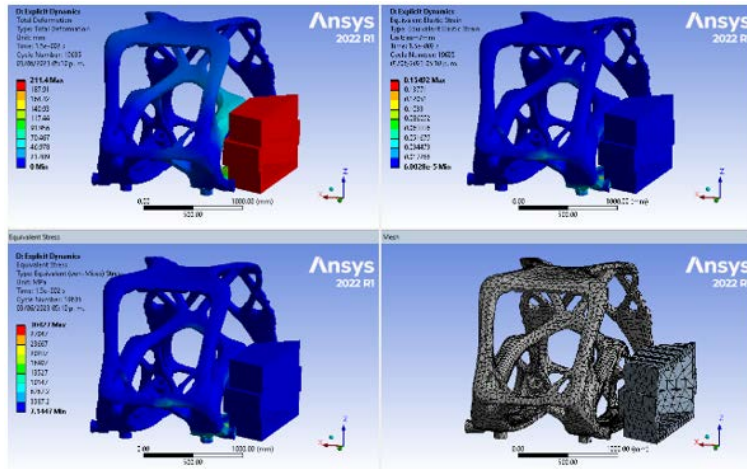


Figura 10. Impactos laterales en chasis monocasco.



La elección entre un chasis monocasco y uno *Spaceframe* depende de las condiciones de producción y los métodos de manufactura. El monocasco es adecuado para la producción en masa, mientras que el *Spaceframe* utiliza métodos más detallados y costosos. Ambos modelos cumplen con normativas específicas y pruebas de impacto, así como con los requisitos de resistencia a la torsión<sup>4-6</sup>.



Se considera que el chasis seleccionado puede implementar formas de manufactura aditiva en secciones estructurales complejas, utilizando el acero 960 Dual Phase y las conexiones tubulares del mismo material.

El proceso de independencia de malla usado en los modelos de optimización topológica demostró una precisión aproximada del 2% al 3% en los cálculos y simulaciones, lo que proporciona resultados confiables para respaldar las decisiones de diseño y optimización.

En resumen, la elección y el diseño del chasis se basan en consideraciones de producción, métodos de manufactura, normativas de seguridad y de rendimiento. Ambos modelos cumplen con los requisitos y ofrecen opciones adecuadas para el mercado. Además, se pueden utilizar técnicas de manufactura aditiva en secciones estructurales complejas, y el proceso de independencia de malla garantiza resultados precisos en las simulaciones.

**Tabla 1.** Resultados sintetizados de cada estructura

<b>Aspecto</b>	<b>Monocasco</b>	<b>Spaceframe</b>
Reducción de masa	35%	35%
Capacidad de carga	Cumple con requisitos	Cumple con requisitos
Métodos de manufactura	Producción en masa	Detallados y costosos
Cumplimiento de normativas	Cumple con normativas de seguridad (aprox. 221 mm promedio de deformación en impactos)	Cumple con normativas de seguridad (aprox. 350 mm promedio de deformación en impactos)
Pruebas de impacto	Supera pruebas de impacto	Supera pruebas de impacto
Resistencia a la torsión	39000 Nm/grado	60000 Nm/grado
Manufactura aditiva	Secciones estructurales complejas	Secciones estructurales complejas
Independencia de malla (precisión en simulaciones)	2% - 3% de error	2% - 3% de error

## Referencias

1. M. P. Bendsøe y O. Sigmund, *Topology optimization: theory, methods, and applications*. Berlin ; New York: Springer, 2003.
2. D. H. Besterfield, «Total Quality Management». J. G. Ardila-Marín, D. A. Hincapié-Zuluaga, y J. A. Sierra-del-Río, «INDEPENDENCIA DE MALLA EN TUBOS TORSIONADOS PARA INTERCAMBIO DE CALOR: CASO DE ESTUDIO», *Rev. Fac. Cienc.*, vol. 5, n.o 1, pp. 124-140, ene. 2016, <https://doi.org/10.15446/rev.fac.cienc.v5n1.54231>.
3. Budynas, R. G., & Keith Nisbett, J. (n.d.). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9na Edición
4. Krzikalla, D., Mesicek, J., Petru, J., Sliva, A., & Smiraus, J. (2019). Analysis of Torsional Stiffness of the frame of a formula student vehicle. *Journal of applied Mechanical Engineering*.
5. Poma, A., & Quezada, P. (2018). *Diseño y fabricación del chasis para un kart KF4 según la normativa CIK/FIA*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.



# Confort térmico, cualidades tectónicas y bioclimáticas de las viviendas de bahareque en la Sabana cordobesa

Ana Gabriela Tirado Baltazar\*  
Gloria Esther Urrea Ceferino\*\*

---

\* Universidad Pontificia Bolivariana, programa de Ingeniería Civil,  
ana.tirado@upb.edu.co

\*\* Universidad Pontificia Bolivariana, Grupo de Investigación GICA, programa de Ingeniería Civil; gloria.urrea@upb.edu.co

## Resumen

El objetivo principal de esta investigación en curso es estudiar las cualidades tectónicas y bioclimáticas de las viviendas construidas de bahareque, en la sabana de Córdoba, para entender cómo se adaptan y responden a las condiciones climáticas de la región, especialmente, en confort térmico, sensación de calor y características de los materiales utilizados como conductividad térmica. Por medio de un sondeo a los habitantes de las viviendas tradicionales se busca identificar cómo las viviendas de bahareque aprovechan o mitigan factores como las altas temperaturas y la radiación solar intensa en la zona. Además del confort térmico, se considerará la sensación de calor percibida por los residentes, teniendo en cuenta la temperatura, dirección del viento y velocidad del aire, la humedad relativa y el vestuario. También se analizará los parámetros de resistencia térmica de los materiales utilizados en la construcción de las viviendas, evaluando las cualidades tectónicas, la densidad, la conductividad térmica y el calor específico de los materiales. Los resultados de esta investigación podrán utilizarse para proponer el mantenimiento y la construcción de nuevas viviendas sostenibles y confortables en la región de la Sabana cordobesa.

**Palabras clave:** confort térmico, bahareque, conductividad, mediciones, cualidades tectónicas.

## Abstract

The aim is to examine the tectonic and bioclimatic properties of wattle and daub houses in the Cordoba Savannah. This study aims to understand how these houses adapt to and respond to the region's climatic conditions, focusing on thermal comfort, heat sensation, and material properties, such as thermal conductivity. By surveying residents living in traditional homes, we seek to identify how Wattle and Daub's houses utilize or mitigate factors like high temperatures and intense solar radiation. Besides thermal comfort, the study will consider residents' heat perception, temperature, wind direction and speed, relative humidity, and clothing. Additionally, we will analyze the thermal resistance parameters of the construction materials, evaluating their tectonic qualities, density, thermal conductivity, and specific heat. The findings from this research can inform the maintenance and construction of new sustainable and comfortable homes in the Sabana Cordobesa region.

**Keywords:** Thermal Comfort, Wattle and Daub's Houses, Conductivity, Measurements, Tectonic Qualities.



## I. Introducción

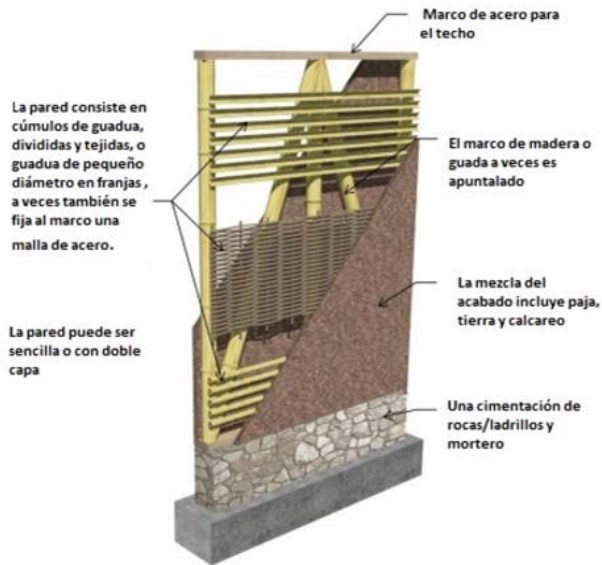
El origen del bahareque se remonta a la época precolombina, cuando las civilizaciones indígenas de América utilizaban esta técnica para construir viviendas y otras estructuras. Dentro de las civilizaciones indígenas que utilizaban este material se encuentran los mayas, náhuatl (aztecas), quechuas, Aymaras, tainos, guaraníes y, en la región colombiana, los muiscas, taironas, zenúes, emberas, Wounaan, guambianos y wayúus. Posteriormente, durante la época colonial, esta técnica se difundió ampliamente por el resto del continente, especialmente, en las zonas rurales<sup>1</sup>.

A lo largo de la historia, el bahareque ha evolucionado y se ha adaptado a diferentes contextos y necesidades. Se han desarrollado técnicas y variantes regionales, utilizando materiales locales y aprovechando los recursos disponibles en cada lugar. En la región de la Sabana cordobesa, donde las temperaturas pueden alcanzar niveles altos y la radiación solar es intensa, es crucial estudiar cómo las viviendas de bahareque aprovechan o mitigan dichos factores climáticos para proporcionar un ambiente interior confortable. El confort térmico es esencial para el bienestar y la calidad de vida de los residentes y puede tener un impacto significativo en aspectos como la salud, la productividad y el consumo energético<sup>1,2</sup>.

Por lo general, las construcciones de bahareque se elevan sobre un soporte de piedra o ladrillo para reducir el riesgo de humedad, cuentan con un amplio voladizo en el techo y emplean materiales naturalmente duraderos, como la madera o la madera tratada, así como el bambú (en América Latina se utiliza, además, jabón de cerdo, tradicionalmente elaborado con grasa de cerdo y ceniza)<sup>3</sup>. En la Figura 1 se pueden observar algunas de las principales características estructurales del bahareque tradicional<sup>4</sup>.

Además de considerar el confort térmico, también este proyecto de investigación se enfoca en evaluar la sensación de calor percibida por los residentes, que va más allá de la temperatura del aire. Factores como la dirección y velocidad del aire, la humedad relativa y el vestuario son determinantes en la percepción del confort térmico. Por lo cual, se estudiará la manera en que las viviendas de bahareque, en la Sabana cordobesa, se adaptan a estos factores para mantener un ambiente interior agradable y adecuadamente climatizado.

**Figura 1.** Composición de pared de bahareque<sup>4</sup>.



Como las viviendas de bahareque son un ejemplo de cómo la arquitectura tradicional puede contribuir al bienestar y a la sostenibilidad ambiental en las regiones cálidas, pues dichas construcciones ofrecen un confort climático excepcional, sin sacrificar la estética ni la funcionalidad<sup>1,2</sup>, se analizará la conductividad térmica de los materiales utilizados en la construcción de las viviendas de bahareque. Dado que el bahareque es un sistema constructivo que emplea materiales naturales, como el barro, la madera y la caña flecha, es importante evaluar de qué modo estos materiales afectan la transferencia de calor y la eficiencia energética de las viviendas. Además, se busca identificar las ventajas y limitaciones de los materiales de construcción empleados según su capacidad de aislamiento térmico y su resistencia al calor.

Con este proyecto se espera obtener un mayor conocimiento sobre las cualidades tectónicas y bioclimáticas de las viviendas de bahareque en la Sabana cordobesa. Los resultados de esta investigación podrán ser utilizados para mejorar el diseño y la construcción de viviendas sostenibles y confortables, promoviendo, así, el bienestar de los residentes y la eficiencia energética en la región.

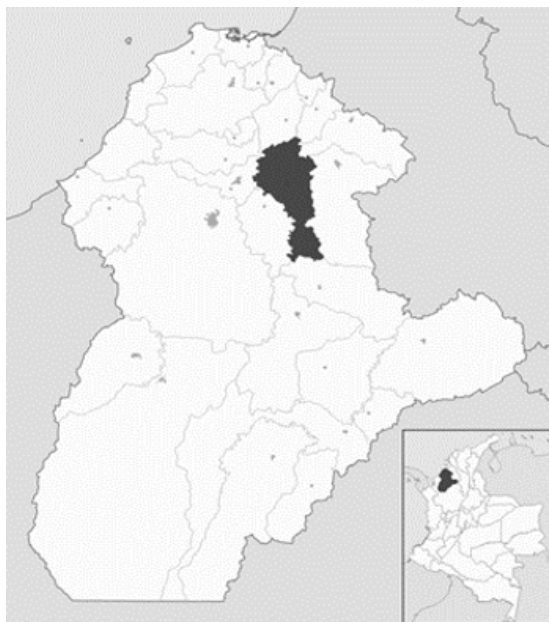


## 2. Métodos

Para este proyecto de investigación se implementará el método cuantitativo, lo que implica la utilización de técnicas y herramientas específicas para recolectar y analizar los datos.

Las viviendas que serán estudiadas se localizan en el municipio de Ciénaga de Oro (Figura 2) y son consideradas de interés cultural por su tradicional y poco convencional método de construcción artesanal. Estas viviendas son de carácter emblemático para este municipio (Figura 3).

**Figura 2.** Ubicación municipio Ciénaga de Oro.



**Figura 3.** Viviendas de bahareque en el municipio Ciénaga de Oro.



Fuente: elaboración propia, septiembre de 2023.

*2.1 Análisis de las bases de datos:* sistemas de información geográficos, *softwares* que permiten la obtención de información acerca de las temperaturas, la posición del sol, la humedad relativa, dirección y velocidad del viento, entre otros aspectos que permitan cumplir con los objetivos de la investigación.



*2.2 Sondeo:* se realizó a personas que viven en las viviendas de bahareque en el municipio de Ciénaga de Oro, ubicado en el departamento de Córdoba, Colombia. Con los datos obtenidos por medio de estas entrevistas se tiene resultados eficaces en cuanto a la obtención de información, lo cual permite ser asertivos, ya que la percepción de los habitantes de estas viviendas es fundamental para esta investigación. Estas encuestas se realizaron de acuerdo con la NORMA ASHRAE 55-2013 – Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana (aprobada por ANSI)<sup>5</sup>.

*2.3 Toma de datos con equipos de alta tecnología por parte del grupo investigador:* El investigador participa de forma activa con un equipo que permite la medición de la temperatura superficial de las paredes construidas de bahareque.

Para la realización de esta investigación se utilizaron los instrumentos de medición de temperatura y conductividad térmica indicados en la Tabla 1.



**Tabla 1.** Equipos para toma de datos de temperatura al interior y exterior de las viviendas

Descripción del equipo	Imagen del equipo
<p>Pistola laser infrarroja de medición de temperatura: con este equipo se pudieron tomar las temperaturas superficiales.</p>	
<p>Cámara de termografía: detecta y mide la energía infrarroja de los objetos. La cámara convierte los datos infrarrojos en una imagen electrónica que muestra la temperatura aparente de la superficie del objeto medido.</p>	

- **Cualidades tectónicas:** se destaca la función estructural y estética de cada elemento arquitectónico. Las casas seleccionadas reflejan una relación con el ensamblaje de partes, lo entretejido y lo compuesto de varias partes, usando materiales de disponibilidad local, orgánicos y de origen renovable<sup>6</sup>.
- **Enfoque bioclimático:** este enfoque presenta una perspectiva alternativa que se centra en las estrategias de diseño destacadas en las casas seleccionadas, especialmente, aquellas que demuestran una sólida adaptación de los recursos fluctuantes en microclimas y el perfil de demanda variable del programa de construcción. Con el análisis de datos meteorológicos de Ciénaga de Oro se generarán diagramas y visualizaciones de datos que resultan fundamentales para explicar el comportamiento del calor al interior de estas viviendas. Además, se conocen las necesidades de confort<sup>7</sup>. Los diagramas trazan la necesidad climática (esencialmente, la ubicación del punto de datos cuando cae sobre la carta bioclimática) en función del tiempo en valores arbitrarios y escalas de tiempo<sup>7</sup>.

- **Confort térmico:** una vez recopilados los datos cualitativos y cuantitativos, se realiza un análisis de contenido para identificar patrones, temas recurrentes y relaciones entre las diferentes respuestas. Esto permitirá obtener conclusiones y obtener una comprensión más profunda de las cualidades tectónicas y bioclimáticas de las viviendas de bahareque en la Sabana cordobesa.

### 3. Resultados y discusiones

Con respecto al confort térmico, las viviendas de bahareque poseen una excelente capacidad de regular la temperatura interna de forma natural. El uso de materiales (p. ej. el barro) actúa como aislante térmico, lo cual proporciona una temperatura agradable en el interior, tanto en la época de calor como en la de frío.

Como se puede apreciar en la Tabla 2, las temperaturas en el exterior de las viviendas son 2 °C más altas, por lo que se puede afirmar que el bahareque disminuye la temperatura en su interior en, al menos, 2 °C. Las temperaturas tomadas por el grupo investigador, fueron: temperatura máxima de 38 °C al exterior de la vivienda y en su interior de 36 °C; y una temperatura mínima de 28 °C al exterior y de 26 °C al interior.

De acuerdo con el registro histórico de temperaturas del municipio de Ciénaga De Oro, la temperatura máxima fue de 38 °C en los meses cálidos (de enero a mediados de abril) y una temperatura promedio de 36 °C; mientras que la temperatura mínima fue de 23 °C (Figura 4).

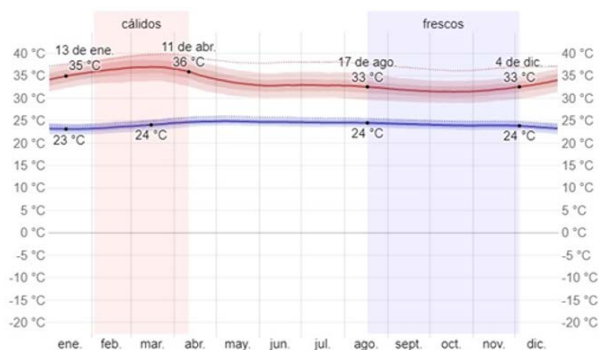
**Tabla 2.** Temperaturas exteriores e interiores de las viviendas de bahareque (tomadas con pistola laser infrarroja de medición de temperatura, 1 de septiembre de 2023)

Temperatura día soleado		Temperatura día nublado	
Exterior	Interior	Exterior	Interior
32°C	30°C	28°C	26°C
36°C	34°C	29°C	27°C
35°C	33°C	29°C	27°C
36°C	34°C	30°C	28°C
37°C	36°C	32°C	30°C
38°C	36°C	32°C	30°C



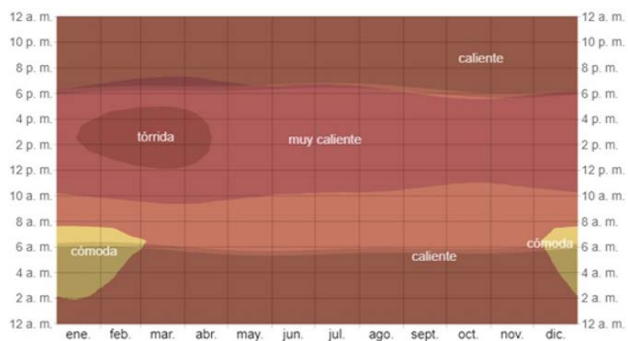
En los meses frescos, que empiezan a mediados de agosto, se presenta una temperatura mínima promedio de 24 °C.

**Figura 4.** Temperaturas máximas y mínimas.



Fuente: Weather Spark

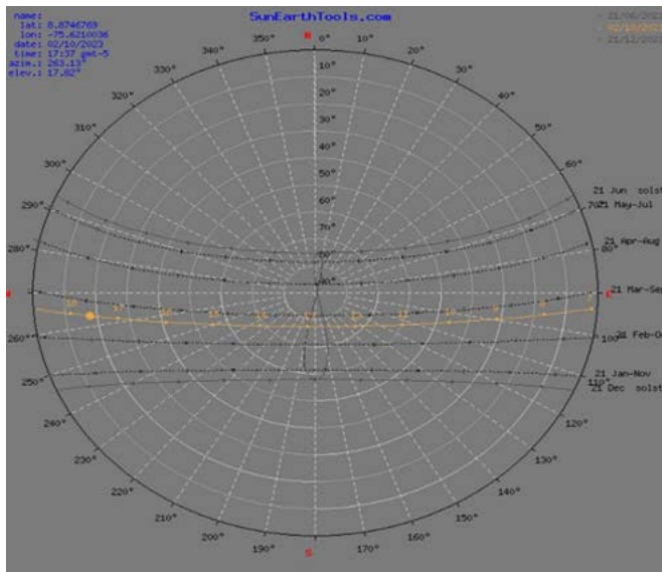
**Figura 5.** Temperatura promedio por hora en el verano en Ciénaga de Oro.



Fuente: Weather Spark.

Como se puede ver en la Figura 5, las horas más cómodas son en las horas de la madrugada, en meses como diciembre y enero.

**Figura 6:** Carta solar del municipio de Ciénaga de Oro.



Fuente: *The solar Tool.*

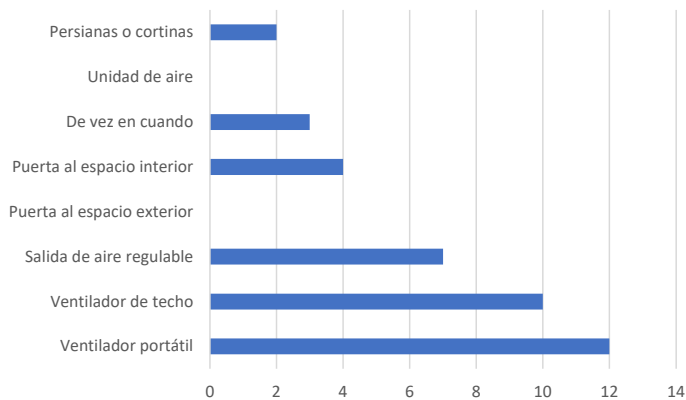
En la Figura 6 se puede apreciar la carta solar en el municipio de Ciénaga de Oro, en ella se muestra la posición del sol a lo largo del día con respecto a la ubicación geográfica, localizado a los  $8^{\circ}53'$  latitud norte y  $75^{\circ}53'$  de longitud.

Según las figuras anteriores, se puede afirmar que el bahareque también demuestra una notable eficiencia energética, ya que la construcción se destaca por su bajo consumo energético. Los materiales naturales utilizados y la orientación adecuada de las viviendas permiten aprovechar al máximo la luz solar y la ventilación natural, lo cual reduce la necesidad de utilizar sistemas de climatización artificiales. Sin embargo, cabe anotar que, en el primer levantamiento realizado, el 1 de septiembre de 2023, los habitantes de las casas de bahareque que fueron encuestados hacían uso ventiladores.

Del mismo modo, dichas viviendas poseen sostenibilidad ambiental dado que son respetuosas con el medio ambiente, pues utilizan materiales renovables y de bajo impacto ambiental. Además, su construcción requiere de menos energía y recursos, en comparación con las viviendas convencionales. La mayor parte de la población encuestada, 6 casas (con una población de entre 1 y 6 personas por vivienda), solo usa ventilador portátil o fijo para disminuir la sensación de calor (Figura 7).

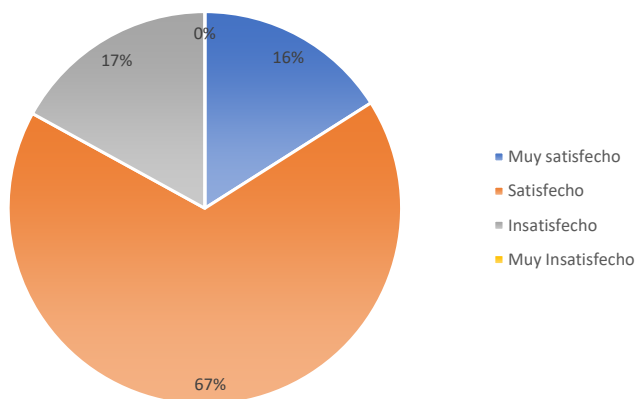


**Figura 7.** Sondeo de percepción, pregunta 5: ¿Qué elementos o dispositivos utiliza para controlar el confort térmico en su vivienda?



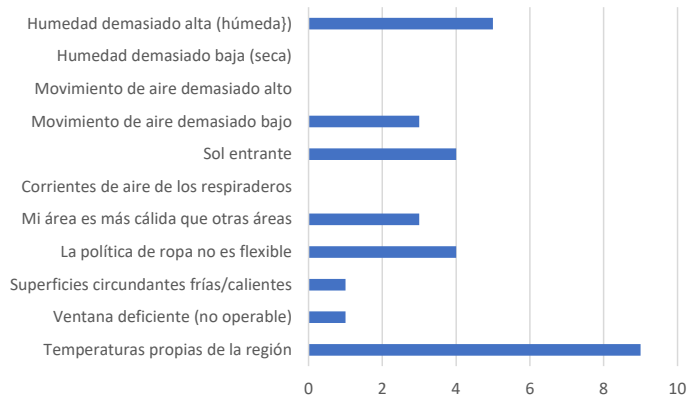
La mayoría de las personas encuestadas manifestaron sentirse cómodas en las viviendas de bahareque. Según su opinión son mucho más frescas que las convencionales (Figura 8).

**Figura 8.** Sondeo de percepción, pregunta 6: ¿Qué tan satisfecho está usted con la temperatura al interior de la vivienda?



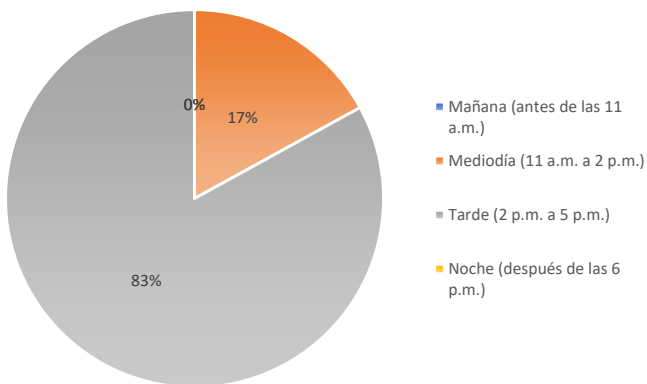
De la misma manera, las personas encuestadas manifestaron que la sensación de calor es por el clima cálido de la región y otros factores como la vestimenta, la sensación de humedad y el sol que penetra en la vivienda (Figura 9).

**Figura 9.** Sondeo de percepción, pregunta 7: ¿Cómo describiría mejor la fuente de este malestar?



La población encuestada manifestó, además, que las horas más calurosas del día son de 2:00 a 5:00 pm, ya que la intensidad del sol a estas horas es mayor (Figura 10).

**Figura 10.** Sondeo de percepción, pregunta 8: Horas más calurosas del día.





Según estudios anteriores, como el de González-Pérez y López-Pérez<sup>8</sup>, las viviendas de bahareque regulan la temperatura interna por las propiedades aislantes del barro, el cual proporciona confort térmico en diferentes condiciones climáticas. Otro estudio, realizado por Cuevas *et al.*<sup>9</sup>, ha demostrado que las construcciones de bahareque tienen un bajo consumo energético y una mayor eficiencia energética, en comparación con las viviendas convencionales. Esto se debe a que los materiales naturales utilizados actúan como aislante térmico y permiten un mejor aprovechamiento de la luz solar y la ventilación natural.

**Figura 11.** Interior de una vivienda de bahareque en el municipio de Ciénega de Oro.



## 4. Conclusiones

En el municipio de Ciénega de Oro, al igual que en muchos otros de la costa Caribe colombiana, se ha venido dando el fenómeno de la construcción con materiales convencionales y arquitectura poco funcional, y esto ha propiciado el aumento de la sensación térmica al interior de las viviendas, junto con el incremento de gastos energéticos que buscan maximizar el confort al interior de las casas. Por otro lado, las tradicionales viviendas de bahareque han demostrado tener cualidades bioclimáticas, pues tienen una excelente capacidad para regular la temperatura interna de manera

natural, gracias a que sus materiales (diferentes según la zona analizada) actúan como un aislante térmico, lo cual proporciona un ambiente agradable al interior, tanto en la época de calor como en la de lluvia, de día y de noche, lo que contribuye al confort de sus habitantes. Además, estas viviendas presentan una destacada eficiencia energética con materiales naturales y su correcta orientación, lo que permite el máximo aprovechamiento de la luz solar y de la ventilación natural. Esto, además de reducir la dependencia a los sistemas de climatización artificiales, también disminuye el consumo de energía y, a su vez, la huella ambiental de las viviendas.

Finalmente, cabe señalar que esta investigación ha cuantificado y validado lo que de forma intuitiva ya se conocía con respecto a la utilización del bahareque en la construcción de viviendas. Además, ha dado a conocer el grado de satisfacción de los habitantes de dichas viviendas, en cuanto al confort térmico que proporcionan en su interior.

## Referencias

1. Las viviendas de bahareque y su confort climático. Revista de Arquitectura Sostenible. (2019).
2. Arquitectura Vernacula De bahareque Y Palma Amarga En El Caribe Colombiano. José Luis Suárez Montiel; Lina Marcela Trujillo Grajales. 19 ° SIACOT Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra Oaxaca, México, 2019.
3. Carazas-Aedo W. & Rivero-Olmos A. (2013) A Wattle and Daub Anti-seismic. Construction Handbook. [Online]. Disponible en: [https://www.misereor.org/fileadmin/user\\_upload/misereororg/cooperation/en/construction/handbook-anti-seismic-construction.pdf](https://www.misereor.org/fileadmin/user_upload/misereororg/cooperation/en/construction/handbook-anti-seismic-construction.pdf) (Accessed: Noviembre 2023).
4. Kaminski, Sebastian & Lawrence, Andrew & Trujillo, David. (2016). Design Guide for Engineered Bahareque Housing. 10.13140/RG.2.2.19916.82569.
5. NORMA ASHRAE 55-2013 – Condiciones ambientales térmicas para ocupación humana (Aprobada por ANSI).
6. Frampton, K. (1981). Historia critica de la arquitectura moderna.
7. Kyle Steinfeld, Pravin Bhiwapurkar, Anna Dyson, Jason Vollen,(2016). Situated Bioclimatic Information Design: a new approach to the processing and visualization of climate data. Center for Architectural Science and Ecology, RPI
8. González-Pérez, L., & López-Pérez, A. (2017). Bahareque: Un sistema constructivo vernáculo eficiente en climas cálidos. Revista de La Sociedad Central de Arquitectos, (275), 29-35.
9. Cuevas, A., Ríos, P., & Hernández, L. (2019). Análisis comparativo del comportamiento térmico y energético de sistemas constructivos tradicionales y modernos. Revista Internacional de Arquitectura Sostenible y Energías Renovables, 62(1), 51-64.



# Mezcla asfáltica en caliente, mezcla sostenible: reporte de caso de la cerámica residual

Rubén Darío Bonilla García\*  
Wendy Yolaine Díaz Piña\*  
Norma Cristina Solarte Vanegas\*

---

\* Universidad Pontificia Bolivariana, programa de Ingeniería Civil;  
ruben.bonilla@upb.edu.co; wendy.diaz@upb.edu.co; norma.solarte@upb.edu.co

## Resumen

El objetivo de este proyecto es la utilización de residuos cerámicos, como sustituto del agregado natural en mezclas asfálticas en caliente (MAC). El propósito, también, es el de promover la sostenibilidad, realizando ensayos de deformación plástica y fatiga para confirmar la reducción de la dependencia de los recursos naturales en la construcción de carreteras. La metodología empleada en esta investigación, todavía en curso, se basó en la ejecución de los ensayos de control de calidad a los materiales para desarrollar MAC, según las especificaciones del INVIAS, con 0%, 30% y 35% de triturado cerámico (TC), posteriormente, se realizaron probetas y, se ejecutaron ensayos de deformación plástica y se continúa con los ensayos de fatiga. Los resultados tempranos indican que la incorporación de cerámicos triturados en las mezclas asfálticas puede competir con las MAC convencionales, y que la reincorporación de este residuo a la cadena comercial podría ser posible, de acuerdo a los resultados técnicos. Los ensayos de deformación plástica mostraron que las mezclas con cerámicos presentan un comportamiento similar o mejor que las mezclas convencionales, lo que resalta su viabilidad técnica. La conclusión central es que el TC es un material atractivo desde el punto de vista del ahuellamiento como residuo industrial en el nororiente colombiano, el TC se convierte en una opción viable para reemplazar parte del material de agregado natural en la construcción de pavimentos, en un porcentaje del 30% en peso, lo que puede conducir a una disminución significativa de volúmenes de explotación, y esto favorece la promoción de prácticas más sostenibles en la industria de la construcción de pavimentos. Este estudio ofrece una solución innovadora para contribuir con los objetivos de desarrollo sostenible en la región.

**Palabras clave:** reciclaje, cerámico, MAC, residuo industrial.

## Abstract

The use of ceramic waste as substitutes for natural aggregate in hot mix asphalt (MAC), with the purpose of promoting sustainability, carrying out plastic deformation and fatigue tests to confirm the reduction of dependence on natural resources in road construction is the objective of this project. The methodology used was based on the execution of quality control tests on the materials and MACs were developed, according to INVIAS specifications, with 0%, 30% and 35% ceramic grinding, subsequently, test specimens were made and, plastic deformation tests were carried out and fatigue tests are continuing. Early results indicate that the incorporation of crushed ceramics in asphalt mixtures can compete with conventional MAC, and that the re-incorporation of this waste into the commercial chain could be possible due to the technical results. Plastic deformation tests showed that mixtures with ceramics present similar or better behavior than conventional mixtures, which highlights their technical feasibility. The central conclusion is that crushed ceramic (TC) is an attractive material from a technical point of view as industrial waste in northeastern Colombia. This makes it a viable option to replace part of the natural aggregate material in pavement construction, which can lead to a significant decrease in exploitation volumes, favoring the promotion of more sustainable practices in the pavement construction industry. This study offers an innovative solution to contribute to sustainable development goals in the region.

**Keywords:** Recycling, Ceramic, HMA, Industrial Waste.



## I. Introducción

La ingeniería civil ha respondido al llamado mundial, expresado en los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), particularmente, en el campo de la infraestructura vial, mediante la incorporación del reciclaje de residuos industriales, enfocándose de este modo en los ODS 9 y 12. Esto busca reducir el consumo de agregados vírgenes, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por medio de la reducción de producción de procesos industriales contaminantes (Unidas, s.f.). En España se han registrado experiencias exitosas con residuos cerámicos, con los resultados de módulos dinámicos (Solarte, 2022) y en la construcción de MAC en plantas industriales (Vea Folch, 2013) y en la construcción de carreteras, con una incorporación del 30% y un rechazo del 50% (Silvestre, 2013). De igual manera, en Turquía existen investigaciones relacionadas que confirman el uso del residuo cerámico con agregados de MAC, con resultados satisfactorios en valores del 20% y 30%, confirmados con ensayos de rigidez dinámica y deformación plástica (Karacasu, 2017).

En la región del nororiente colombiano, la producción de arcillas para la industria cerámica es una actividad destacada. La empresa más importante de la región es Cerámica Italia S.A., en la ciudad de Cúcuta, Norte de Santander (Cerámica Italia S.A, s.f.). Así que, aprovechando esta situación, y teniendo en cuenta que ya se ha investigado en Colombia la competencia de dicho material y se han ejecutado ensayos de módulos dinámicos con el 30% de sustitución, obteniendo resultados favorables (Solarte, 2022), se ha decidido continuar con el desarrollo de esta investigación, pero, en este caso, para evaluar la deformación plástica y la fatiga. Actualmente la incorporación de residuos o modificadores a los insumos tradicionales está evaluándose de manera predominante, por ejemplo, se está experimentando con vidrio, polímeros, polvo de hierro, polivinilo de cloruro y PVC; pues el objetivo es lograr MAC de producción más limpia. La reincorporación del residuo TC a la cadena comercial completa el sustento técnico, para que los empresarios tengan herramientas y puedan decidir mejor sobre la producción de MAC sostenibles.

Sustituir agregado grueso o fino por TC es una tarea cuidadosa, ambos insumos son competentes al evaluar las especificaciones técnicas de construcción en cuanto a limpieza, geometría, dureza y durabilidad. El TC se obtiene de los deshechos de la industria cerámica, específicamente, de las piezas que no alcanzan a cumplir los requerimientos de calidad exigidos en dicha industria. Ese residuo se tritura en planta o manualmente en laboratorio. Con la producción industrial de MAC con TC se ayudaría a cumplir, en la región de los santanderes y en el país, el ODS n.º 12: “producción y consumo responsables”, ya que se aumenta el uso de los reciclados

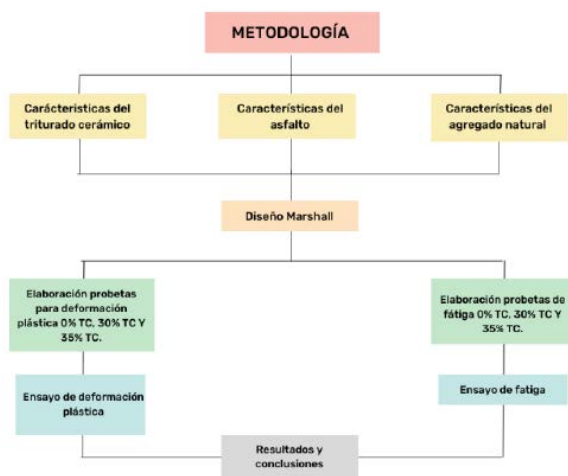
y se hace una mejor gestión de los residuos; y, además, se cumpliría también con el ODS n.º 9: “industria, innovación e infraestructura”, con el que se busca conseguir una productividad sostenible e innovadora. En Colombia, las empresas que manejan el 80% del mercado del país son Cerámica Italia S.A, Colcerámica S.A, Alfagrés S.A y Eurocerámica (Departamento Nacional de Planeación, 2003), por lo que se puede replicar la experimentación con materiales de fuentes diferentes, y así evaluar la aplicabilidad y la factibilidad técnica de dichos residuos. El objetivo de este trabajo es, entonces, demostrar la viabilidad técnica de utilizar residuo TC como sustituto de agregado natural al evaluar el ahuellamiento, con la inclusión de TC, al 30% y 35%.

## 2. Métodos

El diseño experimental desarrollado, que se explica a continuación, contempla el cumplimiento de las especificaciones generales de construcción de carreteras del Instituto Nacional de Vías de Colombia (EGC) (Vías, Especificaciones generales de construcción de carreteras, 2022).

En la Figura 1, se muestra un diagrama de flujo con la secuencia formulada para el desarrollo del proyecto.

Figura 1. Metodología de este proyecto.



Fuente: elaboración propia.



## 2.1 Caracterización de los insumos

Considerando las EGC, se llevaron a cabo los ensayos de dureza, durabilidad, geometría de partículas (para agregado grueso y agregado fino) y limpieza de agregado grueso y gradación combinada (para conocer la competencia de los agregados naturales, tanto finos como gruesos) en los triturados cerámicos gruesos y finos (Vías, Especificaciones generales de construcción de carreteras, 2022). Para conocer las capacidades del asfalto se revisaron las especificaciones para asfalto original, en cuanto a penetración, viscosidad, punto de ablandamiento, ductilidad y punto de inflamación (Vías, Especificaciones generales de construcción de carreteras, 2022). Todo lo anterior para confirmar su idoneidad en la mezcla. Los agregados provinieron de Pescadero, en Santander, y el triturado cerámico de Cerámica Italia. S.A.

## 2.2 Diseño Marshall

Con la comprobación de competencia de los insumos se desarrollaron 12 prototipos de MAC tamaño Marshall, con un diámetro de 10 cm y una altura de 6.35 cm; además, fueron elaborados con el control de temperatura de mezcla entre 145 °C -150 °C y una temperatura de compactación de entre 133 °C y 137 °C. La MAC se construyó de acuerdo a los parámetros de tipo MDC19, con la ayuda de moldes metálicos, martillo y pedestal de compactación. En total, se le aplicaron 75 golpes a la mezcla por ambas caras en el molde. Posteriormente se usó el extractor de muestras, con el fin de dejarlas enfriar durante 24 horas (Vías, Normas de ensayo de materiales para carreteras, 2013). Posteriormente se llevó a cabo el ensayo de estabilidad y flujo. Con el diseño Marshall se pudo obtener el porcentaje óptimo de asfalto, para construir los modelos de los ensayos dinámicos. En la Figura 2 se ilustra la combinación de materiales, para obtener una MAC modificada.

**Figura 2.** Materiales para la manufactura de MAC modificada.

Fuente: elaboración propia.

## 2.3 Ensayos de deformación plástica

Se construyeron modelos de tamaño 15 cm de diámetro y 6.2 cm de alto con 0%, 30% y 35% de cerámico; y luego se sometieron al ensayo de deformación plástica en el equipo de rueda de Hamburgo, se sumergieron en agua a 60 °C y fueron sometidos a 20 mil pasadas, para medir la profundidad de la huella (Officials, 2004). Con este ensayo se evaluó el desempeño frente al ahuellamiento de las MAC en estudio. En la Figura 3 se muestran las probetas con la huella en la letra a), y el equipo de rueda de Hamburgo en las letras b), c) y d).

**Figura 3.** Ensayo de deformación plástica en la rueda de Hamburgo.

- a) Probetas MAC con 0% de TC con la huella marcadas del ensayo;  
en b), c), d) equipo rueda Hamburgo.



a)



b)



c)



d)



## 2.4 Elaboración de modelos y aplicación de ensayos de fatiga

Las vigas (de longitud 38 cm, ancho 6.3 cm y de alto 5 cm) deben construirse para aplicar el ensayo de leyes de fatiga, a las MAC con 0%, 30% y 35% de cerámica. La construcción de las vigas está en proceso para la posterior aplicación de los ensayos y el establecimiento de la resistencia a la carga repetitiva.

## 2.5 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en los ensayos, se determinará la conveniencia de uso del TC en las MAC.

## 3. Resultados y discusiones

A continuación, en la Tabla 1, se presenta la caracterización de los agregados naturales y, en la Tabla 2, la caracterización del triturado cerámico.

**Tabla 1.** Caracterización de agregado natural, fuente de Pescadero

Ensayos	Índice de plasticidad	Caras fracturadas mínimo dos caras (%)	Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	Desgaste en la máquinade Los Ángeles, máximo 500 rev	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	Equivalente de arena, mínimo (%)	Valor de azul de metileno, máximo %	Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo	Impureza en agregado grueso, máximo %	Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo %
Valores	NP	79.20%	7.10%	24.90%	9.40%	62.70%	3.40%	43.10%	0.40%	5%
EGC Invias NT1/NT2 Intermedia TC	NP	75%	30%	35%	18%	50%	10%	40%	0.50%	10%

Fuente: elaboración propia.

**Tabla 2.** Caracterización de triturado cerámico

Ensayos	Índice de plasticidad	Caras fracturadas mínimo dos caras (%)	Degradación por abrasión en el equipo Micro-Deval, máximo (%)	Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo 500 rev	Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, agregados fino y grueso, máximo (%)	Equivalente de arena, mínimo (%)	Valor de azul de metileno, máximo %	Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo	Impureza en agregado grueso, máximo %	Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo %
Valores	NP	100.00%	8.00%	27.00%	-	-	-	37.00%	0.10%	1%
EGC Invias NT1/NT2 Intermedia TC	NP	75%	30%	35%	18%	50%	10%	40%	0.50%	10%

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos del diseño Marshall, MAC 0% TC, se muestran en la Tabla 3, en la que se reporta el cumplimiento de los parámetros de calidad, de acuerdo con los EGC, capítulo 450.

**Tabla 3.** Resultados Marshall MAC 0% de TC

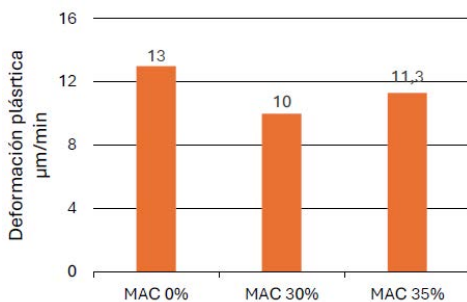
Densidad	Estabilidad máx 9.0 KN	% de vacíos en la mezcla (3-5%)	Flujo (2-4 mm)
2.408 g/cm <sup>3</sup>	13.50 KN	3.8%	3.38 mm
% de vacíos en agregados minerales (65-75%)	estabilidad/flujo (3-5)	llenante/ligante (0.8-1.2)	Contenido óptimo de asfalto
74.50%	4.0	1.20	4.8%

Fuente: elaboración propia.



En la Figura 4 se muestran los resultados de deformación plástica.

**Figura 4.** Comparativo de resultados de deformación plástica.



Lo anterior indica que con la inclusión de cerámica en la producción de asfalto hay una mejoría en los resultados de deformación plástica. Adicionalmente, se recalca que todos los modelos cumplieron con el ensayo puesto, con una valoración máxima de 15  $\mu\text{m}/\text{min}$ , según la norma INVIAS y AASHTO T324-04 (Vías, Normas de ensayo de materiales para carreteras, 2013), (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2004).

De Rondón Quintana se tomaron como referencia los parámetros de 20 °C y 5 Hz (Rondón Quintana, 2015), para comparar los módulos dinámicos de MAC modificada con cerámica (Solarte, 2022), que corresponde aprox. 35-45 Kph, y cuyos valores se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Módulos dinámicos MAC con TC

MAC	MAC 0%	MAC 30%	MAC 35%
Módulo dinámico, 20 °C y 5Hz	7000 MPa	15500 MPa	7450 MPa

Fuente: Datos tomados de (Solarte, 2022).

La favorabilidad de los resultados de deformación plástica coincide con los obtenidos en Turquía, donde se reporta que la deformación plástica disminuyó en porcentajes de 20 y 30% de inclusión de cerámica (Karacasu, 2017).

Con el ensayo de deformación plástica en la rueda de Hamburgo, se obtienen valores satisfactorios, tanto para 30% como para 35%, pero con mayor favorabilidad para el primer porcentaje. Como resultado parcial de esta investigación, el uso del TC en las MAC resulta favorable y recomendable técnicamente, en cuanto a los módulos dinámicos (Solarte, 2022) y también a la deformación plástica.

## 4. Conclusiones

Esta práctica promueve la reutilización de residuos industriales, lo cual contribuye a los ODS y reduce la dependencia de los recursos naturales.

La incorporación de cerámicos triturados en las mezclas asfálticas desarrolladas con la fuente de Pescadero, con asfalto de la empresa Asfaltart y con TC de cerámica Italia, ha cumplido con los parámetros INVIAS para las vías secundarias y terciarias. Con este ensayo se determina el control del deterioro del ahuellamiento de forma temprana.

Además, esta inclusión permite una reducción de las necesidades del consumo energético y la reducción de emisiones de carbono, puesto que se disminuye la explotación de agregados para mezclas asfálticas densas en caliente y de tipo intermedio. Ahora bien, es importante conocer los resultados de fatiga para completar la investigación y la caracterización de las MAC con TC. Este trabajo de investigación ha sido un acercamiento para reaprovechar el residuo cerámico en mezclas asfálticas con el fin de pasar prontamente de la escala de laboratorio a la escala industrial.

## Referencias

1. American Association of State Highway and Transportation Officials,. (2004). *AASHTO, T. 324-04. Standard test method for hamburg wheel track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA)*. Washington DC.



2. Beaumier, J.-L. (2001). *L'isolation phonique écologique*. Rhone-Alpes, Francia: Terre Vivante.
3. Cerámica Italia S.A. (s.f.). *Cerámica Italia*. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.ceramicaitalia.com/corporativo/quienessomos.php>
4. ChovA. (s.f). Manual de aislamiento acústico en la edificación. Valencia, España: ChovA. Obtenido de <https://chova.com/documentacion/catalogos/Manual%20Aislamiento%20Ac%C3%BAstico%202021.pdf>
5. Departamento Nacional de Planeación. (2003). *cerámica*. Recuperado el 01 de 10 de 2023, de <https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/desarrollo%20empresarial/ceramica.pdf>
6. Gimenez de Paz, J. C. (1990). Lana de vidrio como material acústico: Modelo predictivo. *Lana de vidrio como material acústico: Modelo predictivo*, 83-86. Argentina. Obtenido de <http://boletines.secv.es/upload/199029083.pdf>
7. González Espinosa, L. A. (2010). Diseño de paredes con ecomateriales para edificaciones de la Costa Ecuatoriana. Guayaquil, Ecuador. Obtenido de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/10895>
8. Karacasu, K. &. (2017). Use of Ceramic Wastes in Road Pavement Design. *Conference: Proceedings of the World Congress on New Technologies*(226), 1-6.
9. Navacerrada, M., de la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (Marzo de 2021). Comportamiento acústico y térmico de materiales basados en fibras naturales para la eficiencia energética en edificación. *Informes de la Construcción*, 73(561): e373. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/350318913\\_Comportamiento\\_acustico\\_y\\_termico\\_de\\_materiales\\_basados\\_en\\_fibras\\_naturales\\_para\\_la\\_eficiencia\\_energetica\\_en\\_edificacion](https://www.researchgate.net/publication/350318913_Comportamiento_acustico_y_termico_de_materiales_basados_en_fibras_naturales_para_la_eficiencia_energetica_en_edificacion)
10. Navacerrada, M., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (2019). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. *El Sevier*, 4-8. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X19309107?via%3Dihub>
11. Nyugen, X., Honda, T., Wang, Y., & Yamamoto, R. (2010). Eco-materials, Module-H. *Eco-materials, Module-H*. Tokio, Japón: Universidad de Tokio. Obtenido de <http://www.jcdiehl.nl/d4s-sbs/MH.pdf>
12. Officials, A. A. (2004). *AASHTO T324 Standard test method for hamburg wheel track testing of compacted hot-mix asphalt (HMA)*. Recuperado el 25 de 08 de 2023
13. Páez Soto, D. A. (2016). Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua. *Caracterización de las propiedades de absorción acústica de la fibra de la guadua*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/58271#:~:text=El%20objetivo%20general%20de%20esta%20investigaci%C3%B3n%2C%20fue%20el,12%20muestras%20de%204%E2%80%9Dde%20di%C3%A1metro%20y%201%E2%80%9Dde%20espesor.>

14. Rondón Quintana, H. A. (2015). *Pavimentos: materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Macro EIRL.
15. Silvestre, R. M. (2013). Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials*, 115-122.
16. Solarte, N. (2022). *Efecto en el módulo dinámico de la mezcla asfáltico modificada con añadido de residuos triturados de la industria cerámica*. Valencia: Univerisdad Politécnica de Valencia.
17. Unidas, N. (s.f.). *sustainabledevelopment*. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
18. Vea Folch, S. R. (2013). Uso de residuos cerámicos de la industria azulejera en mezclas bituminosas en caliente. *III*(8), 27-38. Obtenido de [https://asefma.es/wp-content/uploads/2014/02/asfalto\\_08.pdf](https://asefma.es/wp-content/uploads/2014/02/asfalto_08.pdf)
19. Vías, I. N. (2013). *Normas de ensayo de materiales para carreteras*. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.invias.gov.co/>
20. Vías, I. N. (2022). *Especificaciones generales de construcción de carreteras*. Recuperado el 25 de 08 de 2023, de <https://www.invias.gov.co/>



# Diagnóstico del sistema logístico de la ladrillera “Los Cerros la 34”

Juliana Madrid Palomino\*  
Mariana Lengua Tobías\*  
María Camila Regino Méndez\*  
Linda Isabel Vergara Naranjo\*  
Valentina Ramírez Hernández\*\*

- 
- \* Estudiante, Universidad Pontificia Bolivariana, Programa de Ingeniería Industrial, [juliana.madridp@upb.edu.co](mailto:juliana.madridp@upb.edu.co), [mariana.lengua@upb.edu.co](mailto:mariana.lengua@upb.edu.co), [maria.regino@upb.edu.co](mailto:maria.regino@upb.edu.co), [linda.vergara@upb.edu.co](mailto:linda.vergara@upb.edu.co)
  - \*\* Docente tutora, Universidad Pontificia Bolivariana, Programa de Ingeniería Industrial, [valentina.ramirez@upb.edu.co](mailto:valentina.ramirez@upb.edu.co)

## Resumen

El presente artículo tiene como objetivo realizar el diagnóstico de un sistema de producción, mediante la integración y aplicación de diferentes contenidos trabajados en la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad Pontificia Bolivariana. Para ello, se toma como estudio de caso la empresa ladrillera "Los Cerros la 34", ubicada en el departamento de Córdoba, Colombia. Por tanto, para abordar la realidad y situación del sistema de producción de dicha empresa, se implementó una metodología mixta de investigación, en la que hubo una recolección de información cualitativa relacionada con la documentación de los principales procesos de gestión del marco logístico, que combina fuentes de información primarias (encuestas a personal de la ladrillera con visitas programadas) cuya finalidad era conocer todo el proceso productivo y logístico de la empresa; como también una recolección de información en fuentes secundarias relacionadas con el mismo sector, a través de la revisión del estado del arte y la elaboración de una matriz de marco teórico para cada subsistema logístico. De esta manera, se confrontaron las brechas entre los procedimientos reales y teóricos, como también se manifestaron los datos cuantitativos, indispensables en el análisis para una comprensión del sistema de producción. Así se conocieron con certeza las principales debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas, las cuales prescriben de forma mucho más puntual las estrategias de mejora que deben ser llevadas a cabo, en función de incrementar la eficiencia de los recursos disponibles, aumentar la productividad y reducir los costos en la empresa. Algunas de las estrategias propuestas fueron la implementación de un sistema de gestión de inventarios, la adopción tecnologías de seguimiento, uso de diferentes *softwares* sobre planeación de recursos, adecuación de los depósitos de materia prima, entre otros.

**Palabras clave:** ladrillera, gestión de inventarios, proveedores, transporte, compras.

## Abstract

The objective of this article is to carry out the diagnostic exercise on a production system, through the integration and application of different contents in the Industrial Engineering career; In this case, the brick company "Los Cerros La 34" located in the department of Córdoba – Colombia is taken as a case study. Therefore, to address the reality and situation of the production system of which company, a mixed research methodology was implemented, where there was a collection of qualitative information related to the documentation of the main management processes within the logistics framework, which combines sources of primary information (surveys of brick factory personnel with scheduled visits) whose purpose was to know the entire production and logistics process of the company, as well as a collection of information from secondary sources related to the same sector, through the review of the state of the art and the development of a matrix of the theoretical framework for each logistics subsystem. In this way, the gaps between real and theoretical procedures were confronted, so in the same way the quantitative data was showed, essential in its analysis for an understanding of the production system. Thus, the main weaknesses, opportunities, strengths and threats were known with certainty, which prescribe in a much more specific way the improvement strategies that must be carried out to increase the efficiency of available resources, increase productivity and reduce the costs in the company. Some of the proposed strategies were the implementation of an inventory management system, the adoption of tracking technologies, the use of different resource planning software, adaptation of raw material warehouses, and others.

**Keywords:** Brickyard, Inventory Management, Suppliers, Transportation, Purchases.



## I. Introducción

El sistema logístico es fundamental para el buen funcionamiento de las empresas, pues constituye el flujo de información de la cadena de suministros, por medio del cual se presenta una sincronización del sistema de producción; normalmente, se compone de cuatro subsistemas, que son: *Customer management*, *Procurement*, *Fulfillment* y *Production*. Ahora bien, teniendo en cuenta que la sincronización de estos cuatro subsistemas fundamentales sea vital para que la operación logística funcione de manera correcta, se hizo el acercamiento a la empresa ladrillera llamada "Los Cerros la 34", la cual se dedica a la producción y comercialización de productos de construcción derivados de la arcilla cocida y que, para este artículo, constituye el estudio de caso con el cual se realizará el diagnóstico de sincronización de dichos subsistemas.

El ejercicio de diagnóstico de un sistema de producción, el cual hace parte del sistema logístico, se realizó bajo una metodología mixta necesaria, entendiéndose los sistemas de producción y después como logísticos, con lo cual se trataría de un sistema complejo cuyo abordaje apropiado sería de tipo cosmológico<sup>1</sup> y, por ende, se obtendrían tanto los datos cualitativos atribuidos a la gestión de sus procedimientos, como a los datos cuantitativos atribuidos a los resultados de dichos procedimientos.

Por tanto, se procuró cerrar la brecha existente entre la teoría y la práctica, por medio del levantamiento del estado del arte que, según se ha hallado, plantea unas variables importantes a estudiar dentro de este tipo de sistema de producción, las cuales ya fueron medidas en la parte práctica y que revelan la gran brecha entre los procedimientos teóricos y los prácticos. De esta manera, la primera parte de este ejercicio estudio de caso, resultó en una documentación del sistema, para recolectar la información de los subsistemas logísticos y proporcionar los datos numéricos de su operación, los cuales era necesario analizar, procesar y medir, para determinar el estado real del sistema de producción. Los resultados muestran los aspectos negativos y positivos de la gestión de dicho sistema de producción, lo que permite que sea más fácil y preciso prescribir algunas estrategias de mejora, en particular sobre aquellas debilidades y amenazas del sistema, como también algunas que ayuden a potenciar los aspectos que fueron positivos.

Este ejercicio de diagnóstico de un sistema de producción y logístico mediante la integración de conocimientos, resulta en aspectos básicos de conocimiento y tratamiento, los cuales deben estar presentes siempre como base fundamental en el abordaje industrial y de producción, pues el análisis detallado de los procesos siempre debe evidenciar los flujos de trabajo, para que finalmente, se llegue a los indicadores de seguimiento y medición de dichos sistemas. Así se cumple la finalidad básica de un diagnóstico que permite visualizar el aumento de la productividad, como meta permanente. Por tanto, puntualizar cuales son las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas del sistema, justifican el abordaje mixto, porque permiten la calidad y la mejora continua.

A partir de lo planteado en la problemática, la pregunta principal de investigación es la siguiente: ¿qué aspectos de la cadena logística de la empresa ladrillera "Los Cerros la 34" se deben mejorar para aumentar su eficiencia y competitividad?

## 2. Métodos

Como se puede apreciar en la Figura 1, para llevar a cabo esta investigación mixta fue necesario implementar los siguientes pasos<sup>2</sup>:

- Investigación de fuentes secundarias de información, como la introducción de ecuaciones de búsqueda en las bases de datos, las cuales contenían las palabras clave. También se revisaron estudios de caso similares en Google Académico.  
Se filtraron los principales documentos a tener en cuenta, con los cuales se diseñó una matriz del estado del arte y, luego, una matriz de marco teórico, con lo que fue posible identificar las variables de estudio en el sistema de producción, así como también la redacción del marco teórico y conceptual<sup>3</sup>.
- Con las variables identificadas se procedió a diseñar una encuesta, la cual fue sometida a la validación de expertos, para ser aplicada por diferentes personas del sistema de producción. Dicha encuesta constó de 55 preguntas. Esto resultó en la documentación cualitativa y cuantitativa de dicho sistema.



Figura 1. Fases de la investigación mixta para el estudio de caso.



- Se tabularon las respuestas de la encuesta a través de una escala Likert, lo cual resultó en la identificación de las principales debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas del sistema. Esto fue insumo para la elaboración de una matriz DOFA, así como para el análisis y tabulación de los datos numéricos. Algunos de los datos numéricos obtenidos y procesados, resultaron en el seguimiento de indicadores clave de rendimiento, como el tiempo de ciclo, la tasa de desperdicio y la utilización de recursos.
- Finalmente, y a partir de la Matriz DOFA, se propusieron las mejoras en el sistema de la ladrillera, por medio de la aplicación de técnicas y herramientas, como la optimización en los puntos de suministro de materias primas, la implementación de sistemas de gestión de inventarios y la automatización de tareas manuales, con lo que se podrían reducir los costos, aumentar la eficiencia y potenciar la calidad del servicio al cliente, todo lo cual se traduce en que la ladrillera podría ser más competitiva en el mercado.

Otras herramientas que se utilizaron fueron Excel (para ponderaciones del análisis de las entrevistas, cálculo de los pronósticos y para la realización de la macro), Rstudio y Google Earth Pro.

De esta manera, no solo se diagnosticó el sistema de producción y logístico del estudio de caso, sino que se realizan las primeras sugerencias de intervención, para mejorar la operación del sistema.

## 3. Resultados y discusiones

Cada fase de la metodología tuvo los siguientes resultados:

### 3.1 Revisión bibliográfica

Para cada uno de los subsistemas logísticos *Customer management*, *Procurement*, *Fulfillment* y *Production*<sup>4</sup>, se seleccionó y se realizó un marco del estado del arte, que sumó 55 documentos.



## 3.2 Identificación de variables

Se hallaron las variables alternativas para la planeación de compras, manejo de inventarios, modelos de organización para la cadena de suministro, análisis de ventas, selección de proveedores, productividad, gestión de la producción, manejo de procesos dentro de la producción, fidelización de clientes, administración de las relaciones con el cliente, tiempos de entrega de los pedidos, gestión y control del cumplimiento de los pedidos y estrategias para el cumplimiento de los pedidos.

## 3.3 Documentación del sistema de producción

Se realizó la documentación con sus respectivas tareas de manufactura, tiempos y costos reales de producción, aspecto que estaba referido en el hallazgo de las variables de estudio. Dicha documentación se compone de las siguientes tareas de manufactura:

- **Acopio:** proceso de recolección, almacenamiento y preparación de materias primas que serán usadas en la fabricación de ladrillos. Extraen 300 toneladas de arcilla y 300 toneladas de arena, se mantienen cerca de la molienda, para facilidad de uso del material.
- **Molienda:** las materias primas se introducen en el molino para su procesamiento, a una determinada proporción de arcilla y arena, o arcilla, arena y ladrillos descartados para la venta por defectos, son triturados hasta convertirse en un fino polvo.
- **Preparación de la mezcla:** el polvo se transporta por medio de bandas y se humedece.
- **Moldeo:** una banda transporta la mezcla a la máquina extrusora de ladrillos, la cual utiliza un proceso de extrusión (la mezcla se presiona en un molde para dar forma al ladrillo) y luego se le hacen cortes, según las dimensiones requeridas.
- **Secado al natural:** acomodan ladrillo por ladrillo en estanterías móviles llamadas camillas, los ladrillos se dejan a temperatura ambiente por 24 horas.
- **Secado por ductos y ventiladores:** los ladrillos se transportan a un cuarto que aprovecha el calor residual del proceso de quemado del horno, a través de ductos, y con ventiladores redistribuyen equitativamente el calor.
- **Proceso de quemado:** posterior al secado anterior, se transportan al horno en el que se queman por 45 min.
- **Inspección:** después de posar por todo el proceso, se seleccionan los ladrillos y se envían al laboratorio para decidir si cumplen con todos los estándares, haciendo pruebas de resistencia y absorción de agua, tanto a temperatura

ambiente como a altas temperaturas. Dependiendo de los resultados se toman medidas correctivas, si son necesarias.

- **Empaquetado (opcional):** cuando los ladrillos se van a entregar, por distancia o por pedido del cliente, se deben recubrir antes de subirlos al camión para su transporte.

### 3.4 Marco teórico

Fue realizado a partir de la comparación de artículos y otros documentos, y en él se destacan aspectos como la eficacia de la gestión de la innovación, el nivel de adopción de tecnologías innovadoras, la mejora de la calidad de los productos, la reducción de costos, el aumento de la productividad y la satisfacción del cliente. También se mencionan aspectos relacionados a la eficiencia en la gestión de inventarios, la calidad del servicio al cliente, la reducción de costos en la cadena de suministro, el tiempo de entrega, la gestión de proveedores, la optimización de procesos, la reducción de tiempos de espera, la eficiencia en el uso del transporte y la reducción de errores en el despacho de pedidos.

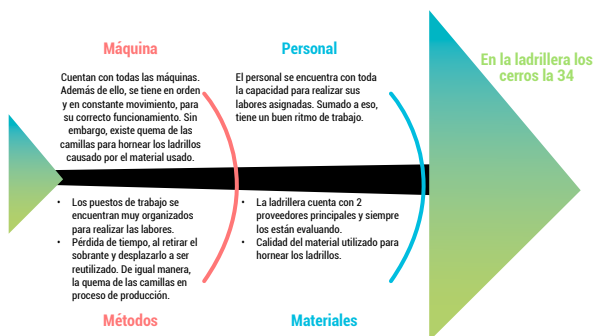
Por tanto, se hace indispensable la estandarización de los procesos logísticos, con apoyo de sistemas de información en cada subsistema, lo que facilita la sincronización de la cadena y el mapa de la cadena de valor.

### 3.5 Comparación de parámetros teóricos

A partir de la documentación de los subsistemas logísticos, se pudo hacer la comparación con los parámetros teóricos sobre los procedimientos para la industria de ladrillos, y se encontró que existen brechas entre la teoría y la práctica.

Así fue que se halló la formulación del problema, mediante el uso del diagrama espina de pescado, tal y como lo muestra la Figura 2:

**Figura 2.** Diagrama de Ishikawa, para hallar las causas del problema en el sistema logístico de la ladrillera "Los Cerros la 34".



### 3.6 Encuesta

Después de esto, se procedió a elaborar una encuesta, la cual fue tabulada en la escala Likert, para reconocer las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas de cada uno de los subsistemas logísticos. Teniendo en cuenta la totalidad de las encuestas, la ladrillera arrojó un total de 2 amenazas, 8 debilidades, 13 oportunidades y 29 fortalezas. Y si bien cuentan con pocas falencias, es vital realizar las respectivas correcciones en aras de una mejora continua así:

- En el subsistema *Production* hay grandes fortalezas, en tanto que se asegura la calidad estética y de producción de los ladrillos; el mantenimiento preventivo a las maquinarias; las pruebas técnicas a los ladrillos en sus diferentes referencias, como también de sus materias primas; usan la capacidad máxima de las maquinarias; y utilizan diferentes métodos para el cálculo de los costos de producción. Como debilidades, se encontró la poca gestión de residuos, que genera un fuerte impacto ambiental.
- En el subsistema *Fulfillment* se encontró que la evaluación de la eficiencia en la distribución de los productos solo era evaluada con el tiempo de entrega, lo cual constituye una debilidad, ya que se debería tener en cuenta la reducción de costos de transporte y la eficiencia en la gestión de la cadena de suministro. También se encontraron oportunidades en los avances de planeación para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- En el subsistema *Procurement* se evidenció la ausencia de técnicas para el seguimiento de los pedidos, en tiempo real, así como también en el seguimiento de las fluctuaciones en los precios de las materias primas.

- Para el subsistema *Customer management* se observó una aplicación deficiente de los métodos de planificación de demanda, y esto les ha generado acumulación de inventario.

### 3.7 Matriz DOFA

Con los resultados de la tabulación de la encuesta y mediante el uso de la escala Likert, se realizó una Matriz DOFA, de la que surgieron las estrategias más prioritarias para la intervención del sistema de producción de la ladrillera. Uno de los aspectos a mejorar de forma prioritaria es la administración de inventarios de materias primas, productos en proceso y productos terminados.

### 3.8 Análisis de datos

Luego se realizó un análisis cuantitativo de los datos, en función de observar el comportamiento de los inventarios, para después analizar las estimaciones de acuerdo a las siguientes ecuaciones<sup>5,6</sup>:

**Ecuación 1:** Cantidad económica de pedido para inventario

$$EOQ \text{ (unidades)} = \sqrt{\frac{2 * A * S}{i * C}}$$

Donde:

A: Demanda anual en unidades.

S: Costo promedio del pedido.

i: porcentaje del costo del mantenimiento.

C: Costo unitario.

**Ecuación 2:** Cálculo del punto de reorden para inventario

$$R = Dd * L$$

Donde:

L: Tiempo de entrega en días.

Dd: Demanda diaria.

R: Punto de reorden.



Esta fórmula se calcula a partir de los parámetros indicados en la Tabla 1, con datos tomados en la documentación:

**Tabla 1.** Parámetros del punto de reorden

Carbón	Dd	13	toneladas/día
	L	7	días

De esta forma se logró calcular el EOQ de materia prima para un escenario con características específicas habituales, el tamaño del punto de reorden del carbón, el cual es un insumo que hace parte del proceso de quemado de los ladrillos (en vista de que no cuenta con una fuente cercana de reabastecimiento), por lo que los tiempos de abastecimiento posibilitan que se genere una nueva orden de compra con una estimación de 93.3 toneladas de carbón.

En vista de ello, se hizo un pronóstico de demanda con diferentes técnicas de series de tiempo, así:

- Repetición de la última demanda (LOR): es una técnica de pronóstico cuya ventaja es la simplicidad, el pronóstico será igual a la observación real del periodo anterior. La limitación es que no tiene en cuenta muchos datos. Se usa la siguiente ecuación:

**Ecuación 3:** Fórmula para pronóstico LOR

$$\hat{Y}_t = Y_{t-1}$$

- Media simple (SA): es una técnica de pronóstico que necesita al menos dos datos reales, no es conveniente para usarse en tendencia, pues si es creciente siempre queda por debajo y si es decreciente queda por arriba de los datos.

**Ecuación 3:** Fórmula para el pronóstico del SA

$$\hat{Y}_t = \sum_{i=1}^{t-1} \frac{Y_i}{t-1}$$

- Media móvil simple (SMA): es una técnica de pronóstico caracterizada por descartar periodos anteriores, siempre tomando una cantidad fija de observaciones, entre mayor sea la cantidad de datos se asemeja a la media simple (SA) y cuando la cantidad de datos a promediarse sea menor, se comporta más como la repetición de la última demanda (LOR).

**Ecuación 4:** Fórmula para el pronóstico del SMA

$$\hat{Y}_t = \frac{\sum_{i=1}^m w_i Y_{t-i}}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

- Suavización exponencial simple (ES): Es una técnica de pronóstico muy sensible, se necesita un parámetro denominado alfa o constante de suavización, alfa debe de estar entre 0 y 1, sin incluir el 0, si alfa es 1 se absorbe 100% del error pronosticado, significa que hay mayor sensibilidad y equivale a LOR, en cambio si alfa tiende a 0 hay mayor estabilidad. La base principal de esta técnica es que necesita pronósticos anteriores.

**Ecuación 5:** Fórmula para el pronóstico del ES

$$\hat{Y}_t = \hat{Y}_{t-1} + \alpha(Y_{t-1} - \hat{Y}_{t-1})$$

- Modelo de regresión lineal: es una técnica de pronóstico matemático que busca determinar la relación entre una variable dependiente (Y), con respecto a otras variables, llamadas explicativas o independientes (X). Para esta técnica es necesario el cálculo de dos parámetros estimados beta 0 (intercepto) y beta 1 (pendiente). Si beta 1 es diferente de 0 significa que nuestro modelo es estadísticamente significativo, es decir, explica los datos.

**Ecuación 6:** Fórmulas para el modelo de regresión lineal

$$\beta_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X}$$

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i - n \bar{Y} \bar{X}}{\sum_{i=1}^n X_i^2 - n \bar{X}^2}$$



- Error cuadrático medio: se utiliza para verificar cuál de las técnicas de pronósticos es más precisa en la situación aplicada.

**Ecuación 7: Fórmula para pronóstico MSE**

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}$$

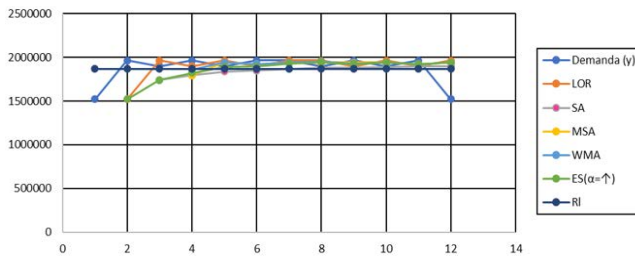
Los resultados de los cálculos se muestran, a continuación, en la Tabla 2:

**Tabla 2.** Evaluación de las técnicas con MSE

Técnicas de pronóstico	Promedio
LOR	3,8653E+10
SA	2,3552E+10
MSA	2,4067E+10
WMA	2,2309E+10
ES(α=1)	2,3698E+10
RL	2,5069E+10

Estos datos fueron graficados en la Figura 3, como se muestra a continuación:

**Figura 3.** Gráfica de los pronósticos.



Por medio de la información que se recolecto durante las visitas a la empresa, el método más conveniente para pronosticar las demandas es WMA (que da mayor ponderación a los pedidos más cercanos), por lo que fue el usado para evaluar el pronóstico.

**Tabla 3.** Pronósticos con el método WMA

Meses (x)	Demanda (y)	WMA
1	1520000	
2	1963334	
3	1900000	
4	1963334	1857778
5	1900000	1942223
6	1963333	1921111
7	1963334	1942222
8	1900000	1952778
9	1963333	1931667
10	1900000	1942222
11	1963334	1921111
12	1520000	1942223
13		1731111

Como los ladrillos no se producen por medio de un proceso de ensamble, en lugar de hacer un cálculo para un MPS, fue mejor hacer un código en *Rstudio* que indica la cantidad de materia prima se necesita para elaborar x números de ladrillos.

De esta manera, se realizó el pronóstico de producción de cantidades ladrillos, así como las cantidades requeridas de materias primas, con el fin de mitigar problemas de excesos y escases de inventarios.



### 3.9 Recomendaciones

Basado en el análisis numérico y en la matriz DOFA, se recomienda lo siguiente:

- Programas de capacitación e ingeniería para los operarios, sobre la importancia de medir y controlar el tiempo del proceso productivo del ladrillo, es decir, el tiempo estándar de producción. Esto permitiría que el personal esté más comprometido con la mejora de la productividad y el cumplimiento de los objetivos de la empresa. Esto permitiría identificar posibles cuellos de botella, ineficiencias y desviaciones en el proceso; y mejorar la productividad.
- Inversión en nuevas tecnologías para las tareas de manufactura, que tengan la finalidad de ser más eficientes y sostenibles para reducir el impacto ambiental de la producción de ladrillos, así como la consideración de la implementación de tecnologías de reciclaje y reutilización de residuos, la utilización de fuentes de energía renovable para el uso de los hornos, la implementación de sistemas de gestión de agua y energía más eficientes. Esto facilitaría la evaluación de la huella de carbono en las áreas en las que más se producen emisiones de CO<sub>2</sub>. También se pueden tener en cuenta alternativas de uso de biocombustibles.
- La empresa podría implementar un sistema de gestión de residuos adecuado y eficiente para minimizar el impacto ambiental de la producción de ladrillos, tales como sistemas de separación y reciclaje de residuos, la gestión adecuada de los residuos peligrosos y la utilización de técnicas de compostaje para la gestión de residuos orgánicos. Esto generaría estrategias circulares de reaprovechamiento.
- La formal consideración sobre la evaluación y mejora de la calidad del servicio al cliente, con el objetivo de ofrecer una respuesta efectiva a las necesidades de los clientes y resolver problemas de manera rápida y eficiente. Esto podría involucrar la implementación de un sistema de seguimiento de reclamos y consultas de los clientes, la capacitación del personal de atención al cliente, entre otros. Esto incluye la mejora de los tiempos de entrega, para aumentar la satisfacción y fidelización de los clientes. Esto que requiere un ajuste en la gestión de la producción y la planificación de la demanda, mediante el uso de tecnologías avanzadas de planificación y programación de la producción. También el incremento de los canales de atención al cliente.
- El desarrollo de un plan de gestión de la innovación que incluya la evaluación de la eficacia de esta, con el objetivo de lanzar nuevos productos y evaluar el retorno de inversión.
- El fortalecimiento del control de calidad de los ladrillos, dentro de lo que se incluiría la selección rigurosa de la materia prima y todo el proceso hasta la venta del producto final. Esto solamente se logrará con el mejoramiento de la

documentación y estandarización del proceso, ya que, a partir de allí, deben salir los parámetros de control, según las mediciones de cada etapa del proceso productivo. Esto también debe contemplar características como cantidad, calidad y plazos de entrega.

Igualmente, conciernen las observaciones que se hicieron a detalle en la tarea de extrusión de ladrillos, pues el desperdicio resultante está siendo retirado manualmente por los operarios de la maquina y, después, recolectado en carretilla para disponer del material sobrante. Aunque hacen reutilización de la merma, este proceso es de carácter circular pero el proceso es mejorable, pues está lejos de ser optimo.

Por ello, el rediseño de esta tarea puede consistir en que la merma caiga por si sola en una banda para reubicar dicho material sobrante del proceso, así no se necesita que los empleados la retiren del ladrillo sin cortar (masa conocida como, "barra de arcilla"), y de ser posible, adecuar la banda que recolecta y se disponga la merma que será reutilizada al ser depositada nuevamente en la molienda. Esto facilita la circularidad del proceso.

- Evaluar la eficiencia en la distribución de los productos de la ladrillera, no solo con el tiempo de entrega y la exactitud de los pedidos, sino también con la reducción de costos de transporte y la eficiencia en la gestión de las flotas, de tal manera que permita controlar el rendimiento de los camiones, la ubicación en tiempo real, el historial de mantenimiento y el consumo de combustible. De esta forma, se pueden optimizar las rutas y minimizar los costos de transporte. Para ello, se deben implementar tecnologías de seguimiento, así como sistemas automatizados de gestión de inventarios.
- Para una buena gestión de los inventarios, se sugiere crear el cargo de almacenista, cuya labor sea la de actualizar la información en cantidad de unidades producidas, unidades descartadas y si existe alguna demanda por medio del uso de macros. Esta información es vital en la correcta planeación maestra de producción y en la planeación agregada de la producción.

Así, la ladrillera podría tener actualizada la información de la cantidad de ladrillos que tienen para la venta, y esta información puede estar disponible para cualquier trabajador de la empresa con acceso al vínculo de la macro en Excel, que es un documento en tiempo real, para agregar y quitar información en este, que la registra y actualiza.

Se diseñaron, entonces, otras macros a modo de prototipo de ejemplificación del fruncimiento de esta sugerencia, como se muestra en la Figura 4.



**Figura 4.** Interfaz de ingreso para la macro.

Ladrillo:	
Cantidad producida	
Cantidad descartada	
Demanda a suplir	
Encargado	
Fecha	

Visualmente la macro estaría compuesta por 2 tablas y un botón (Guardar), en la primera parte se usa una tabla para agregar información, después al oprimir el botón de guardar cambios, la información se enviaría a la siguiente tabla (la cual contiene fórmulas de balance de inventarios), luego, muestra la cantidad de ladrillos existentes, este proceso se puede realizar tanto con la información de ventas (se anota la cantidad de productos vendidos como números negativos al ingresarlos en la tabla de entrada), como con la información de producción (el número de unidades producidas se escribe como un número positivo), y esto asegura el correcto cálculo de las existencias. Asimismo, la macro puede manejar diferentes pestañas una para cada referencia de ladrillo, como se visualiza en la Figura 5.

**Figura 5.** Proceso de balance de inventario basado en la marco.

Cantidad producida	Cantidad descartada	Demanda a suplir	Encargado	Fecha	Balace de inventario
5000	200	3790	Mariana	18/05/2023	10661
10000		50	Linda	18/05/2023	9651
1000	500	800	Camila	18/05/2023	-299
12	1	10	Juliana	18/05/2023	1
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; display: inline-block;">Guardar</div>					Inventario inicial: 0

Anudado a lo anterior, bajo el enfoque de otro *software*, se desarrolló un código en *Rstudio*, que utiliza los porcentajes de proporción de materia prima necesaria en la elaboración de ladrillos, para calcular el material requerido, en caso de que deseara fabricar esa cantidad especifica en lugar de un lote completo de ladrillos. La forma de uso es bastantes intuitiva, con darle un valor a la variable x, el programa arroja un mensaje con la cantidad necesaria de cada material que será imprescindible para la producción de la cantidad x mencionada, como se muestra en la Figura 6.

**Figura 6.** Macro para cálculo de materias primas.

```

#informacion proporcionada en la entrevista
# Definir los porcentajes de cada material en la produccion de
ladrillos
porcentaje_arcilla <- 0.6
porcentaje_arena <- 0.4

# Definir el peso total del ladrillo
peso_total_ladrillo <- 3.7

# Calcular la cantidad de arcilla necesaria en la produccion de
ladrillo
peso_arcilla <- porcentaje_arcilla * peso_total_ladrillo

# Calcular la cantidad de arena necesaria en la produccion de ladrillo
peso_arena <- porcentaje_arena * peso_total_ladrillo

# Mostrar los resultados
cat("Para hacer un ladrillo de", peso_total_ladrillo, "kg se
necesitan:\n")
cat(paste("- Arcilla:", peso_arcilla, "kg\n"))
cat(paste("- Arena:", peso_arena, "kg\n"))

#cantidad de materia prima necesaria para la produccion de x numero de
ladrillos
<- 584 #numero que se cambia para recalcular la cantidad de materia

```

- Maximización del uso del área que se tiene destinada para el almacenamiento del inventario de materias en proceso, puesto que, dependiendo del tipo y del tamaño, hay diferentes precios y dimensiones de silos y tolvas que se recomienda comprar. Se hace necesario también un estudio del espacio que ocupan de área y cotizar cuánto costaría el rediseño, para que la empresa pueda guardar la materia prima y que no se desperdicie como ocurre actualmente (Figura 7).

**Figura 7.** Acopio de materias primas.





Lo anterior, en vista de que las materias primas se encuentran apiladas, en un espacio expuesto a la intemperie y, por tanto, sujetas a la influencia de diversos fenómenos climáticos, como la lluvia y el viento. Lo que puede representar diversos problemas, como la pérdida de materia prima por esparcimiento, una mayor exposición de material particulado en la zona de procesos y en las zonas aledañas a esta, aumento del riesgo de accidentes laborales por piso resbaladizo, y también enfermedades de tipo respiratorio y riesgos de avería para los equipos eléctricos. Una buena alternativa puede ser la siguiente:

**Figura 8.** Alternativas de almacenamiento de silos y tolvas<sup>7</sup>.



- Por último, se recomienda el empleo de otro sistema de almacenamiento de ladrillos en la tarea de quema en el horno, ya que las que están siendo usadas en este momento son hechas de madera y son vulnerables de ser quemadas con frecuencia, por lo que las estibas metálicas son más aconsejables.

## 4. Conclusiones

Se pudieron hallar las principales variables de estudio de las fuentes de información secundarias, como las bases de datos y la documentación del sistema de producción, mediante las visitas programadas a la ladrillera.

Se midieron las variables halladas en la revisión de la bibliografía, las cuales, después de tabuladas, mostraron una brecha entre la realidad y los procedimientos teóricos, lo que ya supone algunas ineficiencias de gestión de la producción, sobre las cuales se planea un análisis de los datos para una ruta de propuestas.

Para la implementación de propuestas, se hace necesario revisar el tema del rediseño de la planta de producción, ya que un nuevo flujo de los procesos de producción con nuevas tecnologías y cumplimiento de normatividades, requiere espacio y reubicación de zonas de producción, además de su control de calidad. En esto radica la importancia de los procesos de documentación y estandarización de procesos: en que facilitan tanto la mejora continua, como su medición.

## Referencias

1. De Barrera, J. H. "Metodología de la investigación holística", 2000. [Online]. Available:
2. "Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (Vol. 4, pp. 310-386). México: McGraw-Hill Interamericana".
3. D. Silva and S. Luis, "Roteiro para Revisão Bibliográfica Sistemática: Aplicação no Desenvolvimento de Produtos e Gerenciamento de Projetos," 2011. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/https://ayudacontextos.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/04/jacqueline-hurtado-de-barrera-metodologia-de-investigacion-holistica.pdf>
4. A. K. Chakravarty, "Springer Texts in Business and Economics Supply Chain Transformation Evolving with Emerging Business Paradigms." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/10099>
5. R. Shumway and D. S. Stoo, "Springer Texts in Statistics Time Series Analysis and Its Applications With R Examples Fourth Edition." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/417>
6. Cryer, J. D., & Chan, K. S. (2008). Time series regression models. Time series analysis: with applications in R, 249-276. [Online]. Available: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-75959-3\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-75959-3_11)
7. SCAFCO Grain Systems Co. "Galería de proyectos", 2024. [Online]. Available: <https://scafcograin.com/language/es/?product=silos-para-agregados>



**Universidad  
Pontificia  
Bolivariana**

## **SU OPINIÓN**



Para la Editorial UPB es muy importante ofrecerle un excelente producto.  
La información que nos suministre acerca de la calidad de nuestras publicaciones  
será muy valiosa en el proceso de mejoramiento que realizamos.

Para darnos su opinión, comuníquese a través de la línea (57)(4) 354 4565  
o vía correo electrónico a [editorial@upb.edu.co](mailto:editorial@upb.edu.co)

Por favor adjunte datos como el título y la fecha de publicación, su nombre,  
correo electrónico y número telefónico.

Las memorias del *II Congreso Internacional de Innovación Tecnológica y Procesos Circulares* y del *II Encuentro de Internacional de Semilleros en Innovación Tecnológica y Procesos Circulares*, organizado por la Universidad Pontificia Bolivariana, Seccional Montería, los cuales se llevaron a cabo del 4 al 6 de octubre de 2023. Este evento reunió a académicos, investigadores, profesionales y estudiantes de diversas disciplinas, con el objeto de explorar y avanzar en el campo de la innovación tecnológica desde un enfoque en los procesos circulares. Las temáticas abordadas este año en el evento se eligieron para reflejar la urgencia de abordar los desafíos ambientales y económicos que enfrenta nuestra sociedad contemporánea. Mediante la colaboración interdisciplinaria y el intercambio de ideas, buscamos transformar la manera en que producimos, consumimos y gestionamos los recursos, promoviendo prácticas sostenibles que puedan ser adoptadas a nivel global.

