

## ECOLADRILLOS: ALTERNATIVA PARA APROVECHAMIENTO DE ARCILLA Y GRANO DE CAUCHO RECICLADO

JUAN SEBASTIÁN GAMBIN-MARTÍNEZ<sup>1</sup>, TATIANA ISABEL BAUTISTA-ZAPATA<sup>2</sup>, LUZ MARINA TORRADO-GÓMEZ<sup>3\*</sup>,  
MARÍA FERNANDA SERRANO GUZMÁN<sup>4</sup>, DIEGO DARÍO PÉREZ RUIZ<sup>5</sup>

<sup>1</sup> DECANATURA DE ESCUELA DE INGENIERÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL; UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA; KM 7 VÍA PIEDECUESTA; JSGAMBINM@OUTLOOK.COM

<sup>2</sup> DECANATURA DE ESCUELA DE INGENIERÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL; UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA; KM 7 VÍA PIEDECUESTA; TATIANA.BZ@OUTLOOK.COM

<sup>3\*</sup> DECANATURA DE ESCUELA DE INGENIERÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL; UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA; KM 7 VÍA PIEDECUESTA; LUZ.TORRADO@UPB.EDU.CO;  [HTTP://ORCID.ORG/0000-0001-8941-7344](http://ORCID.ORG/0000-0001-8941-7344)

<sup>4</sup> FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA; CL. 18 #118-250, CALI; MARIA.SERRANO@JAVERIANACALI.EDU.CO;  [HTTP://ORCID.ORG/0000-0002-7366-6597](http://ORCID.ORG/0000-0002-7366-6597)

<sup>5</sup> FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL E INDUSTRIAL; PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA; CL. 18 #118-250, CALI; DDPEREZ@JAVERIANACALI.EDU.CO;  [HTTP://ORCID.ORG/0000-0002-9656-2803](http://ORCID.ORG/0000-0002-9656-2803)

\*AUTOR CORRESPONSAL

Citación: Gambin-Martínez, J. S.; Bautista-Zapata, T. I.; Torrado-Gómez, L. M.; Serrano Guzmán, M. F. & Pérez Ruiz, D. D. (2023). Ecoladrillos: Alternativa para aprovechamiento de arcilla y grano de caucho reciclado. *Inquietud Empresarial*, 23(1), e15699. <https://doi.org/10.19053/01211048.15699>

Editor: Blanco-Mesa, Fabio

Recibido: 03/03/2023

Aceptado: 01/05/2023

Publicado: 14/06/2023

Códigos JEL: R31

Tipo de artículo: Investigación



**Resumen:** El desmesurado crecimiento poblacional, acompañado de la variedad de actividades económicas que realiza la humanidad para obtener el sustento, está desencadenando un incremento en el consumo de recursos naturales y en la producción de residuos, con la consecuente afectación ambiental. Esta realidad ha motivado la búsqueda de alternativas de incorporación de ciertos residuos a la cadena productiva con el fin de disminuir los sobreconsumos de materias primas para determinados materiales de construcción. Por esta razón, por ejemplo, se encuentran opciones de aprovechamiento de insumos recuperados de los neumáticos como materia prima en mezclas asfálticas, mortero, concreto, entre otros. En este estudio se demuestra la viabilidad técnica, ambiental y económica de la producción de ecoladrillos de suelo-cemento y suelo-cemento-grano de plástico GCR. Se elaboraron mampuestos de 70 % de arcilla previamente tamizada con 20 % de cemento y 10 % de arena y se añadió el agua necesaria para manejabilidad. También, se prepararon especímenes de arcilla-cemento y caucho reciclado (GCR) en los que se encontró que el 7 % de caucho añadido favorecía el comportamiento mecánico del ladrillo preparado. El análisis general de los resultados técnicos, ambientales y económicos obtenidos permite afirmar que estos ecoladrillos contribuyen a la disposición de residuos.

**Palabras clave:** ecoladrillo, grano de caucho, aislamiento, medio ambiente, nuevos materiales.

## ECOLADRILLOS: AN ALTERNATIVE FOR THE USE OF RECYCLED CLAY AND RUBBER GRAIN

**Abstract:** The excessive population growth accompanied by the variety of economic activities that humanity carries out to obtain sustenance are triggering an increase in the consumption of natural resources and in the production of waste, with the consequent environmental impact. This reality has motivated looking for alternatives to incorporate certain waste into the production chain in order to reduce overconsumption of raw materials in certain construction materials. For this reason, for example, there are options to use raw material recovered from tires in asphalt mixes, mortar, and concrete, among others. This study demonstrates the technical, environmental and economic viability of eco-bricks of soil-cement and soil-cement-grain plastic GCR. Masonry was made of 70% previously sieved clay with 20% cement and 10% sand, adding the necessary water for workability. Also, clay-cement and recycled rubber (GCR) specimens were prepared using 7% of rubber that was the addition that favored the mechanical behavior of the prepared brick. The general analysis of the technical, environmental and economic results obtained allows us to affirm that these eco-bricks contribute to the disposal of waste.

**keywords:** eco-brick, rubber grain, insulation, environment, new materials.

### I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional suele señalarse como uno de las responsables del cambio climático actual (Auerbach y Lemery, 2017) debido a que conlleva, entre otros factores, al incremento en el consumo de los recursos naturales, la afectación al paisaje por la densificación de viviendas y negocios, y el aumento en la generación de residuos como producto de la variedad de las actividades antrópicas; a este último hecho hay que sumarle la diversidad de tipologías de los residuos (Minghua et al., 2009). A este respecto, en la actualidad se exigen diversas alternativas de tratamiento según la naturaleza de los residuos, toda vez que opciones como la disposición por incineración repercuten en afectaciones ambientales a la calidad del aire (Jang et al., 1998; Asaro et al., 2018) ante la liberación de dióxido de carbono y metano (Kida et al., 2022; Segre y Joeques, 2000). Justamente, la disposición de estos residuos desencadena una preocupación tanto en zonas urbanas como rurales (Abdel-Shafy y Mansour, 2018; Minghua et al., 2009). Comúnmente se encuentra como residuo retal de madera, metal, papel, cuero, escombros, residuos de demolición, vidrio, plástico, llantas, entre otros, destacándose que la facilidad en su recolección está ligada al compromiso de la comunidad y a la implementación de la normatividad existente para tratamiento y disposición en el lugar en donde los residuos se producen (Valkenburg et al., 2008) evitando así una amenaza ambiental (Sivapriya, 2018).

El objetivo de este estudio es presentar la evaluación técnico-económica de una alternativa de producción de un mampuesto aprovechando el suelo arcilloso como envolvente de caucho proveniente de las llantas. Con relación al suelo, aquel que no puede ser aprovechado en actividades asociadas a los proyectos de construcción, suele disponerse a cielo abierto (Carrillo y Díaz, 2020) o en el mejor de los casos en bancos destinados para su almacenamiento y posterior uso. Con relación a las llantas, se estima que a nivel mundial se desechan anualmente alrededor de 4 mil millones de llantas (Nunton et al., 2022) de los cuales 270 millones corresponden a Estados Unidos (Shaaban et al., 2021) y 24 millones a Canadá (Ospina y Villada Gil, 2011; Benallal et al., 1995), tan solo una fracción reducida de estas se aprovecha (relabra) como neumático de segunda mano, y el restante se convierte en residuo (Sengul, 2016; Köroğlu, 2010).

Justamente, el residuo de las llantas es de naturaleza inerte y se puede recuperar de este la carcasa, el cemento empleado para proteger la oxidación de la carcasa, parches de sello del neumático y cojines provenientes de la vulcanización, la banda de rodamiento, las etiquetas y el hilo de algodón (Cámara de Comercio de Bogotá, 2006), que es una fibra vegetal cuyas capacidades mecánicas deben evaluarse antes del reuso (de la Cruz Velasco et al., 2021). Ahora bien, al respecto del tipo de material recuperable de las llantas, está comprobado que el desarrollo del reciclaje de estas se asocia a la legislación vigente; por ello es clave ofrecer opciones de posibles usos de todo aquello que se recupere (Peláez Arroyave et al., 2017). Como se señala en este estudio, tanto la arcilla como las llantas pueden tener materias primas de uso potencial para nuevos materiales (Urrego Yepes et al., 2017), en este caso para la elaboración de un ladrillo con arcilla evaluado según la Norma Técnica Colombiana NTC 4205-1 (ICONTEC, 2016) y la NTC 5324 (ICONTEC, 2004). Durante el estudio se realizaron diferentes mezclas; la que tenía una adición del 7 % de caucho fue la que mejor se adaptó a las condiciones de manejabilidad y resistencia. En los ensayos realizados a los bloques con caucho, se evidenció que la adición de este material genera una disminución en la resistencia a la compresión, esto último debido a las propiedades elásticas del caucho que pueden generar grietas a la arcilla. Sin embargo, se obtuvieron bloques competentes ante la normativa local, con favorable respuesta a propiedades físicas que mejoraron el comportamiento térmico y acústico del ladrillo producido.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aprovechamiento de residuos de llantas en diferentes aplicaciones industriales

La producción de llantas emplea el 65 % de plástico sintético a nivel mundial (Zheng et al., 2022) y una vez se cumple la vida útil de las mismas, el 90 % del plástico vulcanizado no se recupera con facilidad (Adhikari y Maiti, 2000; Peláez Arroyave et al., 2017), situación que impulsa los estudios acerca de opciones de disposición adecuadas para los desechos (Bakshi et al., 2011) en razón a los grandes volúmenes que se generan (Moasas et al., 2022), a las características de no biodegradabilidad (Xu et al., 2021) y de impermeabilidad (Thomas et al., 2016) de estos residuos, así como por la problemática asociada a su inadecuada disposición a cielo abierto (Rodriguez André y Galal Aboelkheir, 2022), que hace que puedan servir de albergue de roedores, serpientes (Yang, 1993) y otras especies que buscan lugares oscuros para reproducirse (Salinas Tacumá et al., 2019) así como también pueden favorecer la conflagración en épocas secas (Jang et al., 1998). En la Tabla 1 se resumen aspectos relevantes de estudios adelantados sobre aprovechamiento de llantas; su variedad refleja el interés en la reutilización y disposición de este tipo de residuos (Lara Guerrero et al., 2020).

**Tabla 1.** Resultados de estudios previos de productos derivados de las llantas

Descripción del material producido	Comportamiento	Fuente
Bloque de concreto preparado con caucho como sustitución del agregado fino en porcentajes (10 %, 15 % y 20 %).	Las partículas de caucho empleadas en tamaños entre 600µm y 1.7 mm permitieron un bloque con resistencia similar al bloque testigo no estructural según la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 3066 2016-11.	Lara Guerrero et al. (2020).
Concreto de geopolímero preparado con metacaolín, agregados naturales y partículas de caucho de llanta de tamaños entre 0 y 1 mm, 1-5 mm y 5 a 10 mm.	Se redujo el agrietamiento del concreto sometido a compresión, aumenta la capacidad de deformación del concreto y ratifica el posible de la mezcla modificada en concretos livianos, útiles en acabados arquitectónicos.	Albidah et al. (2022).

Geopolímero preparado con poliestireno y residuos de llanta.	Adecuado desempeño en proporciones de 4 % de poliestireno y caucho reciclado de llanta en materiales compuestos para aplicaciones como paneles de aislamiento térmico y acústico.	Villaquirán-Caicedo et al. (2022).
Concreto con residuos de madera, de combustión de biomasa y fibras de neumáticos en tamaños no superiores a 13 mm.	30 % de residuos de madera adecuados y 10 % de fibras de llanta corresponden a las cantidades recomendables de este tipo de agregados no convencionales para concreto. El módulo de rotura en el concreto con estos agregados no convencionales fue superior que el testigo.	Amiandamhen et al. (2021).
Incorporación al asfalto.	Alta resistencia a la fatiga de la mezcla asfáltica producida y reducción del ruido durante el funcionamiento de la vía.	Hosseinezhad et al. (2019), Chen et al. (2019), Asgharzadeh et al. (2018).
Asfalto mezclado con residuos de llanta en tamaño inferior al tamiz No. 30 (0.595 mm).	Mejora el comportamiento de la mezcla asfáltica y la resistencia a la fatiga de la mezcla preparada.	Xu et al. (2021).
Mezcla asfáltica preparada con asfaltita (sustituyendo 5 % y 10 % del asfalto) y caucho recuperado de llanta (8 % como agregado fino).	Incremento en la resistencia para soportar altas cargas y capacidad para recuperarse luego de deformaciones.	Mantilla-Forero y Castañeda Pinzón (2019).
Producción de mezcla asfáltica preparada con grano de caucho obtenido de llantas en tamaño menor a 6.3 mm y polietileno de baja densidad en tamaño menor a 4.76 mm mezclados con Gilsanita, un componente químico (Husil) y cemento asfáltico 60/70.	Mejor comportamiento ante deformaciones permanentes, aumento en la resistencia a fatiga del asfalto y menor pérdida de masa en la mezcla asfáltica obtenida.	Delgado-Jojoa et al. (2018).
Geomaterial producido con plástico de llantas y material granular cumpliendo adecuadas características ambientales y geotécnicas.	Adecuado en cimentaciones para edificaciones livianas y de poca altura.	Tasalloti et al. (2021).
Fibras de caucho recuperado de las llantas.	Concreto con inclusión de 1 % de fibra de llanta arrojó una resistencia a la abrasión y a la compresión similar a la del concreto testigo.	Mohammad et al. (2022).
Losas de concreto preparado con cascarilla de arroz (10 %) sustituyendo al cemento y 3.7 % de caucho reemplazando arena.	Disminución de consumo de cemento y menor producción de desperdicios de llantas y de cascarilla de arroz al ambiente.	Sampaio et al. (2022).
Materiales compuestos preparados con cemento y con adiciones hasta 10 % de caucho recuperado de llanta.	Buena resistencia al descascaramiento.	Medina et al. (2018).
Recuperación y uso de fibras de llantas en desuso en la preparación de concreto.	Dificultad de recuperación de la fibra e incorporación en el concreto requiriendo el uso de plastificantes para manejabilidad de la mezcla. Adecuada funcionalidad a compresión de losas.	Carrillo y Díaz (2020).
Polímero caucho epoxi de naturaleza semicristalina producido con caucho pulverizado de llantas y magnetita pulverizada (Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ).	Buen comportamiento frente a corrosión ambiental, útil en piezas que requieran movimiento o que deban permanecer en posiciones específicas con la ayuda de imanes o en aplicaciones donde el compuesto debe ser fácilmente detectable.	Salinas Tacumá et al. (2019).
Concreto preparado con microesferas de vidrio y caucho recuperado de llantas.	15 % de sustitución en peso con microesfera de vidrio y caucho favoreció la resistencia mecánica a compresión del concreto.	Valencia-Villegas et al. (2021).

Descripción del material producido	Comportamiento	Fuente
Caracterización de una mezcla granular no ligada con caucho de llanta de desecho para capas de subbalasto.	Adiciones entre 1 y 10 % de caucho (en peso) de material de subbase mejora la resistencia a la degradación. Sin embargo, como la capacidad portante se reduce, se recomienda limitar el contenido de caucho a <5 %. Para el uso del caucho pueden emplearse equipos de construcción convencionales.	Hidalgo Signes et al. (2015).
Reducción del potencial de hinchamiento de la arcilla española mediante la adición de partículas de caucho triturado de neumáticos de desecho.	La mezcla de suelo expansivo natural con partículas de caucho hasta un 15 % produce un material más ligero y hasta un 3 % menos propenso a hinchamiento.	Hidalgo Signes et al. (2016).

En la actualidad ha tomado auge el reciclaje de llantas (Albidah et al., 2022), solución que está haciendo parte de la economía circular que promueve las prácticas sostenibles (Arulrajah et al., 2015) en la producción de bienes y servicios (Ferronato et al., 2019; Ellen MacArthur Foundation, 2013; Rada et al., 2021) aportando de esta forma con beneficios sociales, ambientales, económicos y de recursos (Rada et al., 2021) en esta industria. Para quienes tienen la inquietud de reciclaje de llantas se enfrentarán al reto particular del reciclaje del caucho, a razón de que este se produce de la mezcla de elastómeros con aditivos orgánicos, agentes vulcanizantes y cargas minerales (Peláez Arroyave et al., 2017). Bajo este principio, se busca incorporar los residuos de llantas a la cadena productiva de nuevos materiales (Sampaio et al., 2022) o extraer materiales existentes o subproductos obtenidos al recoger las llantas desechadas (Batayneh et al., 2018; Thomas et al., 2016) ratificando que la disposición a cielo abierto genera los problemas anteriormente mencionados (Tasalloti et al., 2021; Valencia-Villegas et al., 2021).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Caracterización del suelo y caucho reciclado

Para caracterizar el suelo a ser utilizado en la fabricación de los ecoladrillos, se realizaron los ensayos de granulometría, límites de Atterberg y peso específico siguiendo los estándares de calidad recomendados por Torrado Gómez y Serrano Guzmán (2016). El caucho reciclado se sometió a los ensayos de granulometría y masa unitaria. Estas pruebas permiten obtener la distribución del tamaño de las partículas y la densidad aparente de ambos materiales.

#### 3.2 Dosificación del caucho reciclado en la mezcla

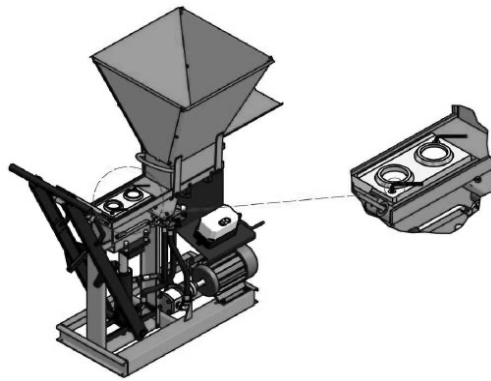
La dosificación consistió en reemplazar volumen de arcilla con grano de caucho reciclado mediante mezclado manual. Por prueba y error se encontró que el nivel de sustitución de 7 % (de caucho molido en vez de arcilla) presentaba adecuada manejabilidad.

El primer tipo de ladrillo elaborado consistió en una matriz de arcilla-cemento, en la que se empleó la arcilla previamente tamizada disponible en una planta de producción de ladrillos, esto con el fin de eliminar las partículas de mayor tamaño que pudiesen afectar la manejabilidad de la mezcla. Posteriormente, se le añadió una porción de arena y cemento brindándole mayor manejabilidad y resistencia al bloque ante cargas de compresión. Para preparar la mezcla se distribuyeron uniformemente los materiales (70 % de arcilla, 10 % de arena y 20 % de cemento) y el agua se añadía hasta que cualitativamente la mezcla adquiriera la consistencia recomendada para la elaboración de los bloques.

El segundo tipo de bloque elaborado correspondió a arcilla-cemento y caucho reciclado (GCR). Estos bloques fueron elaborados de manera similar a los de arcilla-cemento, adicionándoles proporciones de caucho del 5 %, 6 % y 7 %. Todos los especímenes elaborados se sometieron a proceso de curado de manera manual mediante el proceso de rociado con agua tres veces al día durante veintiocho días. Al término de este proceso se dejaron secando a temperatura ambiente durante al menos veinte días antes de ser ensayados.

### 3.3 Elaboración de los ecoladrillos

Para el proceso de fabricación de los bloques fue utilizada la prensa hidráulica ECO BRAVA (Eco Máquinas, 2020), que consta de un gato hidráulico y una tolva que permite el llenado del material y su apisonado en una formaleta de un bloque modular (Eco Máquinas, 2020). En la Figura 1 se observa la máquina empleada, y en la Figura 2 se muestran los bloques fabricados.



**Figura 1.** Máquina ECO BRAVA

Fuente: Eco Máquinas (2020).



**Figura 2.** Ecoladrillos: a. Bloque de arcilla-cemento, b. Bloque de arcilla-cemento-caucho (GCR)

Fuente: Bautista y Gambin (2017).

### 3.4 Ensayos de laboratorio a ecoladrillos

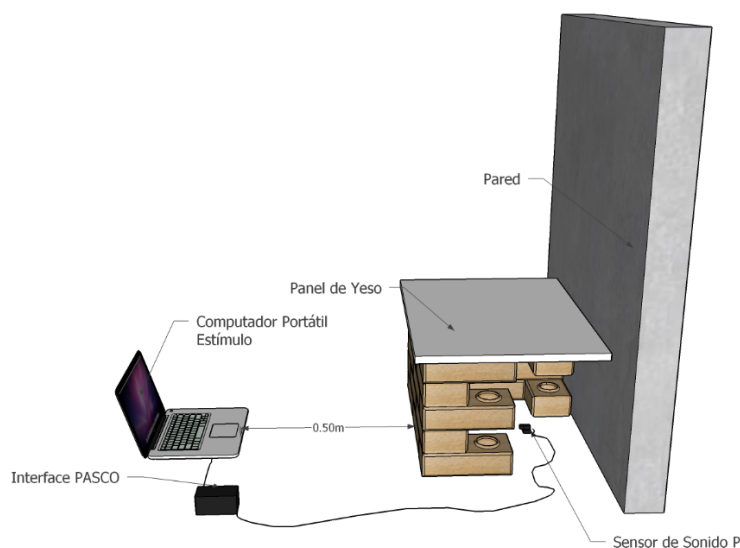
Los ensayos realizados a los ecoladrillos se relacionan en la Tabla 2. Se acogen a las Normas Técnicas Colombianas NTC 4017 (ICONTEC, 2005) y NTC 3495 (ICONTEC, 2003).

**Tabla 2.** Ensayos de laboratorio a los ecoladrillos

Ensayo	Especímenes ensayados	Norma técnica
Determinación de la masa	10	NTC 4017
Ensayo de mediciones (longitud, ancho y profundidad)	10	NTC 4017
Resistencia a la compresión	5	NTC 4017
Módulo de rotura	5	NTC 4017
Compresión de muretes	5	NTC 3495
Tasa inicial de absorción	5	NTC 4017
Absorción de agua 24 h	5	NTC 4017
Ortogonalidad	10	NTC 4017
Alabeo	10	NTC 4017
Defectos superficiales de bloques de mampostería	10	NTC 4017

### 3.5 Ensayos de aislamiento acústico

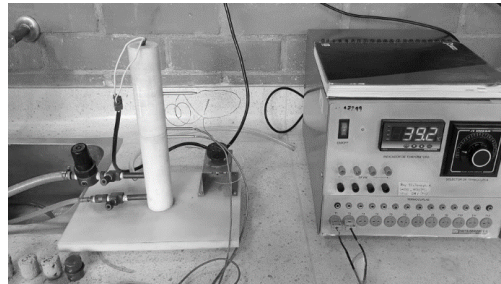
La medición de la intensidad de sonido se realizó usando un equipo de medición de PASCO Scientific, que consiste en un sensor de sonido conectado a una interfaz que puede ser leída digitalmente usando una computadora y un software de recepción de datos. Se realizaron mediciones en decibeles usando como estímulo los parlantes de una computadora en el rango del espectro audible (20-20.000 Hz), cuidando de mantener un ruido ambiente constante. Las mediciones se realizaron dentro y fuera de un espacio construido a partir de ladrillos modificados con caucho y ladrillos estándar. El espacio adecuado se puede observar en la Figura 3. La interfaz y el software registran datos de voltaje que se convierten a decibeles. Los datos obtenidos se registran en una línea de tiempo comparando los decibeles con las frecuencias emitidas por el estímulo, de esta manera se pudieron establecer puntos de comparación entre los ladrillos estándar y los modificados.



**Figura 3.** Montaje del ensayo acústico

### 3.6 Ensayos de aislamiento térmico

Para determinar la conductividad térmica que ofrece el ladrillo de arcilla-cemento y el de arcilla-cemento con caucho reciclado se utilizó el “dispositivo de transferencia de calor” del Laboratorio de Transferencia de Calor, de la Facultad de Ingeniería Mecánica, de la Universidad Pontificia Bolivariana. Este aparato posee los siguientes componentes: termostato, resistencia eléctrica, recubrimiento de teflón en la cámara de transferencia y un sistema de flujo de agua interno, como se puede apreciar en la Figura 4.



**Figura 4.** Dispositivo de transferencia de calor

El ensayo consistió en colocar dentro de la cámara de transferencia recubierta de teflón una probeta cilíndrica con dos agujeros en un costado. La parte superior de la cámara entra en contacto con la resistencia eléctrica, mientras que la parte inferior con el sistema de circulación de agua fría.

La resistencia eléctrica genera calor. Este se transporta por la cámara y viaja a través de la probeta; debido a ello, la probeta tiene dos agujeros a un costado. En ellos se introducen dos termómetros de punta que permiten determinar la temperatura en cada uno de los puntos y, por ende, la diferencia de temperatura que se presente en la probeta.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Clasificación del suelo y propiedades del caucho reciclado

En la Tabla 3 se presenta la clasificación granulométrica del suelo y del caucho. Con relación al suelo clasificado como CL, se aprecia que es un material arcilloso de baja a media compresibilidad, con un límite líquido de 30, límite plástico de 16 y un índice de plasticidad de 14, con prevalencia de partículas de arena y finos. Referente al caucho, es un material con un predominio de partícula de tamaño de suelos arenosos.

**Tabla 3.** Caracterización granulométrica del suelo y del caucho

Tamiz No.	Suelo			
	Peso retenido (gr)	%	% acumulado	% que pasa
No 4	12,6	2,09	2,09	97,91
No 10	17,4	2,88	4,97	95,03
No 20	23,4	3,88	8,85	91,15
No 40	44,9	7,44	16,3	83,7
No 200	129,3	21,44	37,73	62,27
Fondo	375,6	62,27	100	0



<b>Caucho</b>				
<b>Tamiz No.</b>	<b>Peso retenido (gr)</b>	<b>%</b>	<b>% acumulado</b>	<b>% que pasa</b>
No 4	0	0	0	100
No 10	87,55	13,83	13,83	86,17
No 20	490,13	77,42	91,25	8,75
No 40	45,19	7,14	98,38	1,62
No 60	3,33	0,53	98,91	1,09
No 80	3,11	0,49	99,4	0,6
No 100	2,07	0,33	99,73	0,27
No 200	1,45	0,23	99,96	0,04
Fondo	0,27	0,04	100	0

Como un requisito para la caracterización del suelo, se realizó el ensayo de peso específico y se obtuvo un valor de 2.67 gr/cm<sup>3</sup>. Esto ratificó que el suelo empleado es limoso-arcilloso (Crespo Villalaz, 2004). En cuanto al caucho, se debe mencionar que se empleó aquel que ha sido reciclado de llantas y posteriormente triturado para su uso en jardines y canchas sintéticas. Para su caracterización se ejecutaron pruebas de granulometría y masa unitaria.

El tamaño promedio de una partícula de caucho se encuentra entre el tamiz No. 10 y 20, lo que corresponde a partículas de 2 mm a 0.85 mm. El porcentaje de partículas entre el tamiz No. 4 y No. 100 fue mayor al 50 %, por lo cual se afirma que la muestra de caucho analizada puede ser correlacionada por tamaño con una arena, comprobando la suposición inicial. Luego de realizar el ensayo de masa unitaria a las partículas de caucho, se encontró que la masa unitaria en estado suelto y compacto (gr/cm<sup>3</sup>) fue de 0.416 y 0.467, respectivamente.

#### 4.2 Caracterización del bloque

La masa del ecoladrillo matriz arcilla-cemento fue de 2.916 g, mientras que la de arcilla-cemento-caucho fue de 2.675 g. En cuanto a las dimensiones, luego del proceso de producción se encontraron semejanzas entre el ancho y el largo de los especímenes (Tabla 4).

**Tabla 4.** Dimensiones de los ecoladrillos

<b>Dimensiones de los bloques (cm)</b>			
<b>Arcilla-cemento</b>		<b>Arcilla-cemento-caucho</b>	
Alto (cm)	6.7	Alto (cm)	6.6
Ancho (cm)	12.5	Ancho (cm)	12.5
Largo (cm)	25	Largo (cm)	25

#### 4.3 Propiedades físicas y mecánicas

Los ladrillos modificados con GCR fueron sometidos a ensayos para determinar sus propiedades físicas y mecánicas.

### 4.3.1 Resistencia a la compresión

Siguiendo la NTC 4017, se encontró que la resistencia promedio a compresión del ladrillo GCR fue de 2.89 MPa, mientras que el ladrillo arcilla-cemento fue de 4.72 MPa. Ambos especímenes cumplen el estándar de calidad recomendado para estos mampuestos en Colombia (Tabla 5), lo que comprueba la viabilidad técnica de este material para la construcción (NTC 4017, ICONTEC, 2005).

**Tabla 5.** Valores de referencia - Resistencia a la compresión

Tipo	Resistencia mínima a la compresión (MPa)	
	Prom 5 unidades	Unidad
Unidades Livianas	2.0	1.5
Bloques llenos		BSC 20
Resistencia mínima (R) para la fracción de 0.05 en MPa		2

### 4.3.2 Módulo de rotura

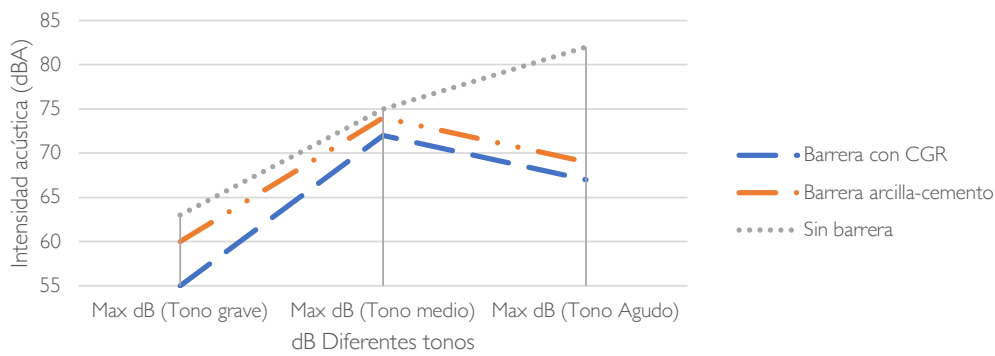
Este ensayo permite determinar el comportamiento del bloque de ladrillo ante una carga puntual. Se encontró que el módulo de rotura del ladrillo GCR fue de 0.71 Pa, mientras que el ladrillo arcilla-cemento fue de 0.78 Pa. Según lo anterior, es posible inferir que la resistencia a la flexión de los ladrillos ensayados, tanto de arcilla-cemento como de arcilla-cemento-caucho, tiene un comportamiento no sobresaliente para este tipo de carga, debido a que están elaborados principalmente de arcilla. Se infiere que puede superarse la fragilidad del mampuesto aumentando la cantidad de cemento.

### 4.3.4 Ensayos de tasa inicial de absorción y absorción

Los promedios de los resultados de tasa inicial de absorción (TIA) y absorción por 24 horas fueron de 0,131 g/cm<sup>2</sup>/min y 0,108 g/cm<sup>2</sup>/min para los ladrillos de suelo-cemento y de GCR, respectivamente. Según la NTC 4205, se recomienda que tras un minuto de humedecimiento de una cara del bloque, los valores de TIA se reduzcan a 0.15 g/cm<sup>2</sup>/min (ICONTEC, 2016). De acuerdo con esto, los resultados de los bloques ensayados con el humedecimiento previo de un minuto cumplen satisfactoriamente con el límite especificado, lo cual indica que pueden ser utilizados con mortero de pega convencional sin que en este se altere su relación agua-cemento.

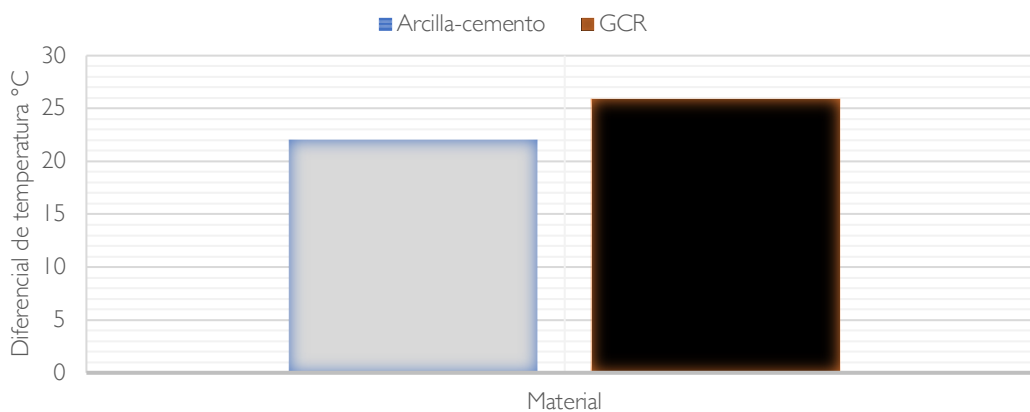
### 4.3.5 Aislamiento acústico

El ensayo acústico permite obtener una comparación entre los decibeles emitidos por un estímulo y los recibidos por un sensor de sonido localizado después de una barrera. En la Figura 5 se muestra el valor máximo de decibeles registrado en el rango de tono en relación con la barrera utilizada.



**Figura 5.** Comparación de los valores de la intensidad acústica en relación con el tipo de bloque utilizado para el aislamiento

En los tres tipos de tono, la barrera con ladrillos modificados con GCR (caucho reciclado y cemento) fue la que registró la menor intensidad acústica, siendo el tono grave aquel en donde se obtuvo la mayor diferencia entre registros de decibeles en comparación con la barrera de ladrillos estándar.

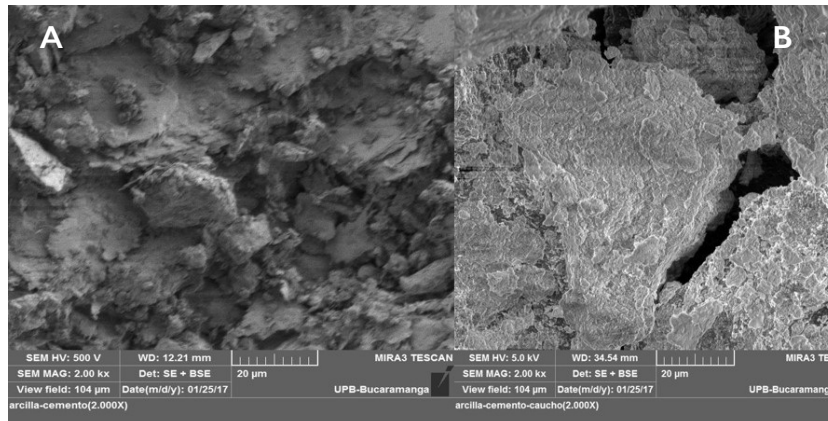


**Figura 6.** Comparación entre diferenciales de temperatura entre los materiales utilizados para la fabricación de ecoladrillos

De acuerdo con los resultados obtenidos, existe una diferencia de 3.9 °C entre los diferenciales de temperatura de cada material, siendo el que contiene GCR el que presenta menor transferencia de temperatura, por lo cual tiene mayor capacidad de aislamiento térmico que el material de arcilla-cemento.

#### 4.3.6 Ensayo de microscopía (SEM)

El ensayo de microscopía permite observar la distribución de las partículas en el compuesto y las fisuras existentes. En la Figura 7a se observa el material de arcilla-cemento a 2000 aumentos y en la Figura 7b la muestra de arcilla-cemento modificada con GCR a la misma cantidad de aumentos.



**Figura 7.** Microscopía a 2000X: a. Material de arcilla-cemento, b. Material de arcilla-cemento-caucho

Como se observa en la Figura 7b, existe microfisuración en la superficie del material, esto se puede explicar debido a la elasticidad del caucho. Como efecto de esta propiedad, cuando el bloque es sometido a compresión en la máquina Eco Brava se empiezan a generar fisuras. Esto explica la disminución en los valores de resistencia a la compresión en los bloques modificados con GCR.

## 5. DISCUSIÓN

En este estudio se empleó 7 % de caucho granular en la preparación de mampuesto. Al igual que en el estudio de Lara Guerrero et al. (2020), se cumplió con los estándares de calidad para producción de mampuesto exigidos en el país en donde se realizó la investigación. Así mismo, se comprueba la viabilidad térmica del material producido, tal y como lo revelan Villaquirán-Caicedo et al. (2022), y un buen comportamiento mecánico con menor cantidad de caucho del que fue empleado por Valencia-Villegas et al. (2021).

Por otro lado, además de la viabilidad mecánica de estos ecoladrillos, el uso de mampuestos ecológicos desencadena beneficios ambientales que se deben destacar. Siguiendo la Guía de Evaluación de Riesgos Ambientales (Viceministerio de Gestión Ambiental de Perú, 2010) y la UNEI 50008 de Análisis y Evaluación de Riesgo Ambiental (Peña Merladet, 2016), se plantea la ecuación 1 para la cuantificación del impacto (I), positivo (+) o negativo (-), asociado a la operación de la planta de producción de ladrillo ecológico. Para ello se incluyen los siguientes atributos: severidad (S); alcance (AL); índice de control en la empresa (alta gerencia 5, personal en planta 3); el momento en que se manifiesta (MO), es decir, inmediato (5), a mediano plazo (3) o a largo plazo (1); su persistencia en el tiempo (PE), como permanente (5), ocasional (3) o no permanente (0); su capacidad de recuperación (MC), como recuperable (5), medianamente recuperable (3) y no recuperable (0); reversibilidad por medios naturales (RV), como reversible (5) o no reversible (3); sinergia (SI), como sinérgico (5) o no sinérgico (0); y por su frecuencia de ocurrencia (F). En la Tabla 6 se aprecia la escala propuesta para valorar AL, F, y S.

$$(I) = \pm (3S + 2AL + MO + PE + RV + IC + F + PR + SI)$$

**Tabla 6.** Criterios para valoración del índice de riesgo ambiental y calificación del riesgo

Alcance (AL)		Frecuencia (F)		Severidad (S)		Descripción
Criterio	Escala	Criterio	Escala	Criterio	Escala	
Lugar de trabajo	1	Rara vez	1	Muy baja	1	Incidencia de impacto insignificante, casi no visible
Toda la fábrica	2	Anual	2	Baja	2	Impacto visible con incidencia baja
Lugares aledaños a la fábrica	3	Mensual	3	Media	3	Presencia de impacto sin efectos relevantes
Barrio/comunidad	4	Semana	4	Alta	4	Incidencia significativa del impacto con afectación relevante en el ambiente
Región geográfica	5	Diario	5	Muy alta	5	Incidencia muy alta del impacto con alta repercusión en el ambiente

**Nota.** Si la actividad califica por un valor de I inferior a 25 puntos, se considera que el impacto que genera es irrelevante o compatible; si la calificación obtenida oscila entre 25 puntos y menos de 50, se clasifica como moderado; si está entre 50 y menos de 75, se considera severo; más de 75 puntos indican que el impacto es crítico.

Con esta escala se plantea la evaluación ambiental (Tabla 7) que arroja un impacto ambiental negativo moderado y abre las oportunidades para la formulación de estrategias de mitigación que implican aspectos técnicos y administrativos.

En relación con las actividades e instalaciones, pueden ser tenidas en cuenta estas dos recomendaciones:

- Para el almacenamiento de materia prima: se debe proveer de un espacio físico adecuado para evitar riesgos de incendio del material de caucho y de humedecimiento de la arcilla y del cemento.
- Durante los procesos e instalaciones productivas: se debe realizar mantenimiento preventivo y correctivo a las máquinas y equipos que se emplean para la selección, mezcla y producción de los mampuestos. Para ello, se deben verificar las condiciones del entorno. También es necesario garantizar que los vertimientos de aguas empleadas en la producción cuenten con un sistema de tratamiento primario. Finalmente, hay que realizar pruebas adicionales al mampuesto, tales como resistencia a la ignición y a esfuerzos cortantes.

En cuanto al personal operativo, se deben verificar periódicamente las condiciones ambientales para el adecuado desempeño de las labores, así como el cumplimiento en el uso de los elementos de protección personal. Por otro lado, es recomendable mantener actualizada la hoja de vida del personal en planta con el fin de programar capacitaciones en destrezas requeridas cuando sea el caso.

**Tabla 7.** Valoración ambiental del proceso de producción de mampuesto ecoladrillo

Proceso	Problemática identificada	Impacto ambiental	Atributos									Total
			S	AL	MO	PE	RV	IC	F	MC	SI	
Selección y clasificación del material	Ruido en el uso de maquinaria para tamizado	Contaminación de ruido	3	2	5	5	3	3	5	3	5	42
	Generación de residuos inertes	Contaminación del suelo	3	2	5	3	3	3	5	3	5	40
	Emisión de material particulado	Contaminación del aire	3	2	5	3	3	3	5	3	5	40
	Consumo de energía	Desgaste de recursos naturales	3	2	5	3	3	3	5	3	5	40

Proceso	Problemática identificada	Impacto ambiental	Atributos									Total
			S	AL	MO	PE	RV	IC	F	MC	SI	
Almacenamiento de material tamizado	Maquinaria en movimiento	Contaminación de ruido	2	1	5	3	3	3	5	3	5	35
	Disposición del material en espacio cubierto	Contaminación del suelo	2	1	5	3	3	3	5	3	5	35
Moldeado y compactado	Residuos de la mezcla	Contaminación del suelo	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31
	Consumo de energía por funcionamiento de equipos	Desgaste de recursos naturales	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31
Desmoldado	Existencia de material de rechazo	Contaminación del suelo	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31
		Contaminación del agua	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31
Secado y curado	Existencia de material de rechazo	Contaminación del suelo	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31
		Contaminación del agua	2	1	3	3	3	3	3	3	5	31

Reviste significativo interés contemplar los costos asociados a la producción de estos ladrillos. A manera de ejemplo, como puede observarse en la Tabla 8, la producción de 1600 ladrillos de suelo-cemento y de GCR representa un valor unitario de US \$0.12 y US \$0.14, respectivamente, frente a US \$ 0.22, que es el valor actual de un ladrillo en una ferretería.

**Tabla 8.** Análisis de precio unitario para mampuesto ecoladrillo

Descripción				Suelo-cemento	GCR
Equipos	Unidad	Cantidad Und/día	Tarifa alquiler	Valor unitario	Valor unitario
Máquina EcoBrava	día	1600	\$ 5,44	\$ 0,0034	\$ 0,0034
Mezcladora	día	1600	\$ 5,44	\$ 0,0034	\$ 0,0068
<b>Subtotal</b>				\$ 0,0068	\$ 0,0102
Materiales	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Valor unitario	Valor unitario
Cemento	kg	0,6	\$ 0,13	\$ 0,0783	\$ 0,0783
Arcilla	m <sup>3</sup>	0,00126	\$ 4,35	\$ 0,0055	\$ 0,0074
Arena	m <sup>3</sup>	0,00018	\$ 18,92	\$ 0,0034	\$ 0,0034
Agua	m <sup>3</sup>	0,005	\$ 0,54	\$ 0,0027	\$ 0,0027
Caucho	kg	0	\$ 0,33	\$ -	\$ 0,0196
<b>Subtotal</b>				\$ 0,0899	\$ 0,1113
Servicios	Unidad	Cantidad	Precio unitario	Valor unitario	Valor unitario
Electricidad	KW/h	0,01125	\$ 0,0598	\$ 0,0007	\$ 0,0007
<b>Subtotal</b>				\$ 0,0007	\$ 0,0007
Mano de obra	Unidad	Consumo	Precio unitario	Valor unitario	Valor unitario
Auxiliar de obra (3)	día	0,000625	\$ 29,98	\$ 0,0187	\$ 0,0187
<b>Subtotal</b>				\$ 0,0187	\$ 0,0187
<b>TOTAL: US \$1 = COP \$ 4599,51 (a fecha de 30 enero de 2023)</b>				\$ 0,1161	\$ 0,1409

Las anteriores evidencias ratifican las ventajas del aprovechamiento del caucho en la preparación de los mampuestos. Así mismo, es claro que el posicionamiento de un nuevo producto en el mercado exige acometer estrategias comerciales con las cuales se pueda afianzar la confianza en el nuevo producto (Serrano Guzmán et al., 2014), que, en este caso, cumple con los requerimientos técnicos.

## 6. CONCLUSIONES

El valor promedio de la resistencia a compresión de los bloques de suelo-cemento y de GCR fue de 4.72 MPa y 2.89 MPa, respectivamente. Si bien el valor de resistencia para los bloques modificados con caucho es menor que el de los de suelo cemento, ambos prototipos cumplen con la exigencia mínima de 2.00 MPa establecida en las normas técnicas colombianas para mampuestos de arcilla y suelo-cemento; lo anterior demuestra la confiabilidad de este producto para fines de construcción de estructuras en mampostería. También se evidenció en la prueba de resistencia a la compresión que las fallas presentadas en los bloques modificados con GCR tuvieron un mejor comportamiento dúctil gracias a la presencia de partículas de caucho, que otorgan al bloque mayor deformabilidad.

En cuanto al comportamiento a flexión de ambos especímenes, los resultados de los ensayos de módulo de rotura permiten inferir que el uso de estos materiales, técnicamente, resulta viable en aplicaciones no estructurales. Por otro lado, el porcentaje de absorción obtenido en los especímenes ensayados indica que los bloques pueden ser ensamblados con mortero de pega a base de cemento; sin embargo, el ensayo de absorción por 24 horas evidenció que ambos tipos de bloque no deben ser sometidos a contacto directo y prolongado con el agua, ya que esta afecta la estabilidad de las propiedades físicas reduciendo la capacidad estructural de los mampuestos. Respecto al peso, se puede afirmar que el grano de caucho reciclado ofreció un mejoramiento en las condiciones de aligeramiento, reduciendo la densidad del bloque modificado con caucho en un 5 %, comparado con el bloque que no fue transformado.

Los resultados de este estudio mostraron también que el bloque GCR posee un adecuado aislamiento acústico, con reducción de 8.50 %, 2.50 % y 0.97 % para tonos graves, medios y agudos, respectivamente, y de 3.90 °C en el diferencial de temperatura entre los dos tipos de mampuesto. Lo anterior ratifica la viabilidad como aislante acústico y térmico del bloque GCR.

El análisis general de los resultados técnicos, ambientales y económicos obtenidos permite afirmar que el uso del grano de caucho, como producto reciclado de los neumáticos, proporciona un aprovechamiento y una solución ambientalmente responsable que no influye en la demanda de producción de llantas y, por el contrario, mitiga el daño ambiental que se genera por inadecuadas prácticas de disposición.

### CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

La conceptualización, metodología, validación y análisis formal es una contribución de Juan Sebastián Gambin Martínez, Tatiana Isabel Bautista Zapata y Luz Marina Torrado Gómez. La redacción-revisión del documento fue realizada por María Fernanda Serrano Guzmán, Diego Darío Pérez Ruiz y Luz Marina Torrado Gómez. La edición fue aporte de Luz Marina Torrado Gómez y María Fernanda Serrano Guzmán. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

### FINANCIACIÓN

Esta investigación no recibió financiación externa.

### DECLARACIÓN DE DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los datos utilizados en esta investigación se encuentran disponibles en el repositorio institucional de la Universidad Pontificia Bolivariana.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana por la disponibilidad de los espacios de experimentación.

### CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

## 7. REFERENCIAS

- Abdel-Shafy, H., y Mansour, M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 7(4), 1275-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Adhikari, B., y Maiti, D. (2000). Reclamation and recycling of waste rubber: Progress in Polymer Sciences, 25(7), 909-948. [https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(00\)00020-4](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(00)00020-4)
- Albidah, A., Alsaif, A., Abadel, A., Abbas, H., y Al-Salloum, Y. (2022). Role of recycled vehicle tires quantity and size on the properties of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete. *Journal of materials, research and technology*, (18), 2593-2607. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.103>
- Amiandamhen, S., Adamopoulos, S., Adl-Zarrabi, B., Haiyan, Y., y Norén, J. (2021). Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, (297), e123781. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123781>
- Arulrajah, A., Narsilio, G., Kodikara, J., y Orense, R. (2015). Key Issues in Environmental Geotechnics: Australia-New Zealand. *Journal of Environmental Geotechnics*, 2(6), 326-330. <http://dx.doi.org/10.1680/envgeo.14.00005>
- Asaro, L., Grattón, M., Seghar, S., y Ait Hocine, N. (2018). Recycling of rubber wastes by vulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*, (133), 250-262. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.016>
- Asgharzadeh, S., Sadeghi, J., Peivast, P., y Pedram, M. (2018). Fatigue properties of crumb rubber asphalt mixtures used in railways. *Construction and Building Materials*, (184), 248-257. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.189>
- Auerbach, P., y Lemery, J. (2017). *Enviromedics: The Impact of Climate Change on Human Health*. Rowman & Littlefield.
- Bakshi, B., Fiksel, J., Baral, A., Guerra, E., y Dequervain, B. (2011). Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technology and Environmental Policy*, 13(1), 19-35. <https://doi.org/10.1007/s10098-010-0289-1>
- Batayneh, M., Marie, I., y Asi, I. (2008). Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. *Waste Management*, (28), 2171-2176. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.035>
- Bautista-Zapata, T., y Gambin-Martínez, J. (2017). Análisis del comportamiento físico y mecánico de ladrillos de arcilla modificados con caucho reciclado. [Trabajo de grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga]. <https://biblioteca.bucaramanga.upb.edu.co/application/index/material/34540>
- Benallal, B., Roy, C., Pakdel, H., Chabot, S., y Poirier, M. (1995). Characterization of pyrolytic light naphtha from vacuum pyrolysis of used tyres comparison with petroleum naphtha. *Fuel*, 74(11), 1589-1594. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00165-2](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00165-2)
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2006). Guía para el manejo de llantas usadas. Un sector transporte con operación más limpia. Editorial Kimpres.
- Carrillo, J., y Díaz, C. (2020). Mechanical Properties of Concrete Slabs Reinforced with Recycled Steel Fibers from Post-Consumer Tires in Bogotá, Colombia. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 30(2), 67-79. <https://doi.org/10.18359/rcin.4412>
- Chen, Z., Wang, T., Pei, J., Amirkhanian, S., Xiao, F., Ye, Q., y Fan, Z. (2019). Low temperature and fatigue characteristics of treated crumb rubber modified asphalt after a long term aging procedure. *Journal of Cleaner Production*, (234), 1262-1274. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.147>
- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. (5ta ed.). Limusa.
- de La Cruz Velasco, L., Chamorro-Mejía, J., y Córdoba-Cely, C. (2021). Characterization Physico-chemical and mechanical of 4 vegetable fibers used as artisanal raw materials in the Department of Nariño. *DYNA*, 88(216), 96-102. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.87958>
- Delgado-Jojoa, M., Sánchez-Gilede, J., Rondón-Quintana, H., Fernández-Gómez, W., y Reyes-Lizcano, F. (2018). Influence of four non-conventional additives on the physical, rheological and thermal properties of an asphalt. *Ingeniería e Investigación*, 38(2), 18-26. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.68638>
- Eco Máquinas. (2020). *Manual Eco-Brava*. <https://www.ecomaquinas.com.br/maquina/eco-brava-semi-manual/>
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy. Economic and business rationale for an accelerated transition*. <https://tinyurl.com/mub298us>
- Ferronato, N., Rada, E., Gorritty Portillo, M., Cioca, L., Ragazzi, M., y Torretta, V. (2019). Introduction of the circular economy within developing regions: A comparative analysis of advantages and opportunities for waste valorization. *Journal of Environmental Management*, (230), 366-378. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.09.095>
- Hidalgo Signes, C., Garzón Roca, J., Martínez Fernández, P., Garrido de la Torre, M. E., y Insa Franco, R. (2016). Swelling potential reduction of Spanish argillaceous marlstone Facies Tap Soil through the addition of cumb rubber particles from scrap tyres. *Applied Clay Science*, (132-133), 768-773. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2016.07.027>
- Hidalgo Signes, C., Martínez Fernández, P., Medel Perallón, E., y Insa Franco, R. (2015). Characterisation of an unbound granular mixture with waste tyre rubber for subballast layers. *Materials and Structures*, (48), 3847-3861. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0443-z>
- Hosseinezhad, S., Kabir, S., Oldham, D., Mousavi, M., y Fini, E. (2019). Surface functionalization of rubber particles to reduce phase separation in rubberized asphalt for sustainable construction. *Journal of Cleaner Production*, (225), 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.219>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2004). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo y Condiciones de entrega (NTC 5324)*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2003). *Ingeniería y Arquitectura. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495)*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2005). *Ingeniería y Arquitectura. Métodos para muestreo y ensayos de unidades de mampostería y otros productos de arcilla (NTC 4017)*. ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas. (2016). *Ingeniería Civil y Arquitectura. Unidades de mampostería de arcilla cocida. Ladrillos y bloques cerámicos (NTC 4205)*. ICONTEC.



- Jang, J., Yoo, T., Oh, J., y Iwasaki, I. (1998). Discarded tire recycling practices in the United States, Japan and Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, 22(1-2), 1-14. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(97\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(97)00041-4)
- Kida, M., Ziembowicz, S., Pochwat, K., y Koszelnik, P. (2022). Experimental and computational hazard prediction associated with reuse of recycled car tire material. *Journal of Hazardous Materials*, (438), e129489. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129489>
- Köroğlu, M. (2010). Mechanical properties of fiber reinforced composite concrete. *Engineering Science and Technology*, 330-336. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2016.62>
- Lara Guerrero, E., Guerrero Cuasapaz, D., y Altamirano León, B. (2020). Influencia de las partículas de caucho en la resistencia a la compresión de bloques de concreto. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería*, 43(3), 134-141. <https://doi.org/10.22209/rt.v43n3a03>
- Mantilla-Forero, J., y Castañeda Pinzón, E. (2019). Assessment of simultaneous incorporation of crumb rubber and asphaltite in asphalt binders. *DYNA*, 86(208), 257-263. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.69400>
- Medina, N., García, R., Hajirasouliha, I., Pilakoutas, K., y Raffoul, S. (2018). Composites with recycled rubber aggregates: Properties and opportunities in construction. *Construction and Building materials*, (118), 884-897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.069>
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., Alessandro, G., y Yi, L. (2009). Municipal solid waste management in Pudong New Area, China. *Waste Management*, 29(3), 1227-1233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.016>
- Moasas, A., Amin, M., Khan, K., Ahmad, W., Ahmad Al-Hashem, M., Deifalla, A., y Ahmad, A. (2022). A worldwide development in the accumulation of waste tires and its utilization in concrete as a sustainable construction material: A review. *Case Studies in Construction Materials*, (17), e01677. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01677>
- Mohammad, S., Chaitanya Krishna, T., Saketh, T., Yashwanth Ganesh, C., y Sathyan, D. (2023). Fresh and hardened state properties of waste tire fiber and steel fiber reinforced concrete. *Materials Today Proceedings*, 80(2), 443-448. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.195>
- Nunton, J., Portocarrero, J., y Muñoz, S. (2022). Review of the mechanical behavior of concrete with the addition of steel fibers from recycled tires. *Ingeniería y Competitividad*, 24(2), 1-18. <https://doi.org/10.25100/iy.v24i2.11741>
- Ospina, J., y Villada Gil, S. (2011). Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM. *Lámpsakos*, (6), 23-31. <https://doi.org/10.21501/21454086.830>
- Peláez Arroyave, G., Velásquez Restrepo, S., y Giraldo Vásquez, D. (2017). Applications of recycled rubber: A literature review. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 1-24. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143>
- Peña Merladet, E. (2016). Evaluación de impacto ambiental en el plano de inundación del río Yara en el tramo urbano del municipio Yara. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 4(1), 59-71.
- Rada, E., Tolkou, A., Katsoyiannis, I., Magaril, E., Kiselev, A., Conti, F., Schiavon, M., y Torretta, V. (2021). Evaluating global municipal solid waste management efficiency from a circular economy point of view. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, (253), 207-218. <https://doi.org/10.2495/SC210181>
- Rodrigues André, F., y Galal Aboelkheir, M. (2022). Sustainable approach of applying previous treatment of tire wastes as raw material in cement composites: Review. *Materials Today: Proceedings*, (58), 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.456>
- Salinas Tacumá, F., Landínez Téllez, D., Garzón Posada, A., y Roa Rojas, J. (2019). Caracterización magnética de material compuesto con matriz de resina epoxi y llanta en desuso reforzado con magnetita en diferentes proporciones. *Tecnológicas*, 22(44), 81-95. <https://doi.org/10.22430/22565337.999>
- Sampaio, D., Tashima, M., Costa, D., Quinteiro, P., Dias, A., y Akasaki, J. (2022). Evaluation of the environmental performance of rice husk ash and tire rubber residues incorporated in concrete slabs. *Construction and Building materials*, (357), e129332. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129332>
- Segre, S., y Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particle as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, (30), 1421-1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00373-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-2)
- Sengul, O. (2016). Mechanical behavior of concretes containing waste steel fibers recovered from scrap tires. *Construction and Building Materials*, (122), 649-658. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.113>
- Serrano Guzmán, M. F., Torrado Gómez, L. M., Pérez Ruiz, D. D., Solarte Vanegas, N. C., y Serrano Guzmán, D. E. (2014). Aplicación de Prefabricados ecológicos: Análisis de Mercado. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga.
- Shaaban, I., Rizzuto, J., El-Nemr, A., Bohan, L., Ahmed, H., y Tindyebwa, H. (2021). Mechanical properties and air permeability of concrete containing waste tires extracts. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(2), 1-6. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003588](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003588)
- Sivapriya, V. (2018). Stress-strain and penetration characteristics of clay modified with crumb rubber. *Revista Facultad de Ingeniería*, 27(49), 65-75. <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n49.2018.8745>
- Tasalotti, A., Chiaro, G., Murali, A., Banasiak, L., Palermo, A., y Granello, G. (2021). Recycling of End-of-Life Tires (ELTs) for Sustainable Geotechnical Applications: A New Zealand Perspective. *Applied Sciences*, 11(17), e7824. <https://doi.org/10.3390/app11177824>
- Thomas, B., Gupta, R., y Panicker, V. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, (112), 504-513. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.046>
- Torrado Gómez, L., y Serrano Guzmán, M. F. (2016). Guía para el laboratorio de materiales de construcción. Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga.
- Urrego Yepes, W., Carona Vásquez, N., Velásquez Restrepo, S., y Abril Carrascal, C. (2017). Revisión - Caracterización de compuestos de caucho con residuos de cuero posindustria. *Prospectiva*, 15(2), 13-25. <https://doi.org/10.15665/rp.v15i2.776>
- Valencia-Villegas, J., González-Mesa, A., y Arbeláez-Pérez, O. (2021). Properties of modified concrete with crumb rubber: Effect of the incorporation of hollow glass microspheres. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (98), 59-68. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200473>

- Valkenburg, C., Walton, C., Thompson, B., Gerber, M., Jones, S., y Stevens, D. (2008). *Municipal solid Waste (MSW) to Liquid Fuels Synthesis. Vol. 1: Availability of Feedstock and Technology*. Pacific Northwest National Laboratory. <https://doi.org/10.2172/962858>
- Viceministerio de Gestión Ambiental. (2010). *Guía para la Evaluación de Riesgos Ambientales*. Ministerio del Ambiente, Perú. [https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia\\_riesgos\\_ambientales.pdf](https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/guia_riesgos_ambientales.pdf)
- Villaquirán-Caicedo, M., Perea, V., Ruiz, J., y Mejía de Gutiérrez, R. (2022). Mechanical, physical and thermoacoustic properties of lightweight composite geopolymers. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), e20710985.
- Xu, X., Leng, Z., Lan, J., Wang, W., Yu, J., Bai, Y., Sreeram, A., y Hu, J. (2021). Sustainable Practice in Pavement Engineering through Value-Added Collective Recycling of Waste Plastic and Waste Tyre Rubber. *Engineering*, 7(6), 857-867. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.08.020>
- Yang, G. (1993). Recycling of discarded tires in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 9(3), 191-199. [https://doi.org/10.1016/0921-3449\(93\)90003-X](https://doi.org/10.1016/0921-3449(93)90003-X)
- Zheng, X., Pramanik, A., Basak, A., Prakash, C., y Shankar, S. (2022). Material recovery and recycling of waste tyres-A review. *Cleaner Materials*, (5), e100115. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100115>