

Exploración del uso de excedentes de procesos industriales como materiales arquitectónicos

Exploration of the use of industrial process surpluses as architectural materials

DOI: 10.17981/mod.arq.cuc.31.1.2023.08

Article. Fecha de Recepción: 3/6/2023. Fecha de Aceptación: 29/6/2023.

Elizabeth Parra Correa 

Universidad San Buenaventura. Medellín (Colombia)
elizabethparra.arq@gmail.com

Román Bonilla Sánchez 

Universidad San Buenaventura. Medellín (Colombia)
roman.bonilla@tau.usbmed.edu.co

Para citar este artículo:

Parra, E. y Bonilla, R. (2023). Exploración del uso de excedentes de procesos industriales como materiales arquitectónicos. *MODULO ARQUITECTURA CUC*, 31, 189–214.
<http://doi.org/10.17981/mod.arq.cuc.31.1.2023.08>

Resumen

La construcción tiene una alta demanda de materiales que ocasiona el aumento de la huella de carbono. Para reducirla, el ecodiseño propone la incorporación de residuos con potencial de reutilización en los productos arquitectónicos. En la industria química, se generan excedentes con alto impacto ambiental; estos materiales podrían aprovecharse como subproductos que cierren ciclos y reduzcan la huella de carbono. Esta investigación explora el potencial de utilización de excedentes industriales como materiales arquitectónicos. Se analizó la función como cielo falso de Resina de Poliéster Insaturado –RPI– en forma de lámina perforada resultante de la fabricación de botones. Se midieron propiedades lumínicas y acústicas del material, se calcularon índices de reflexión y tiempo de reverberación en un modelo hipotético de oficina. Su desempeño lumínico y acústico en cielos, demuestran la viabilidad de incorporar residuos industriales en aplicaciones arquitectónicas y la importancia de evaluar prototipos a escala reducida en investigaciones futuras.

Palabras clave: Material reciclado; excedentes industriales; resina de poliéster insaturado; cielos falsos; iluminación natural; absorción acústica

Abstract

The construction industry has a high demand for materials, which contributes to an increase in carbon footprint. To reduce this impact, ecodesign proposes the incorporation of reusable waste into architectural products. In the chemical industry, there are surplus that have a significant environmental impact. These materials could be utilized as byproducts to close loops and decrease carbon footprint. Thus, this research explores the potential use of industrial surplus as architectural materials, by analyzing the Unsaturated Polyester Resins –UPR– in the form of perforated sheets as surplus from manufacturing buttons, specifically focusing on its function as a suspended ceiling. The material's light and acoustic properties were measured under a hypothetical office model. Acousting and lighting performance of the RPI ceiling, demonstrate the feasibility of incorporating industrial waste into architectural applications and highlight the importance of conducting measurements on scaled-down prototypes for future research.

Keywords: Recycled material; unsaturated polyester resin; false ceilings; natural lighting; acoustic absorption; industrial surplus

INTRODUCCIÓN

En Colombia se generan cerca de 12 millones de toneladas de basura al año, de las cuales se recicla en promedio un 17%. Solo en Bogotá se producen 6 300 toneladas de basura al día, reaprovechando entre el 14% y 15% (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [[Minambiente](#)], 2020). Si se analizan las toneladas generadas por días según los departamentos, se puede evidenciar que Antioquia, Cundinamarca, Bolívar, Valle del Cauca y Cauca presentan los indicadores más altos con más de 1 000 toneladas por día. En el análisis histórico consolidado de las toneladas promedio diaria dispuestas entre el 2010 y 2018 para las ocho ciudades con mayor población del país, se observa que hay una marcada tendencia al aumento de las toneladas dispuestas, dando una alarma sobre la necesidad de tomar acciones concretas para frenar y disminuir este impacto en el ecosistema.

Teniendo en consideración estas cifras hay un creciente interés de la industria por incorporar la circularidad a sus procesos, servicios y productos. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística ([DANE](#), 2020), para el 2018, la tasa de reciclaje y nueva utilización ascendió a 11.1% del total de residuos sólidos y productos residuales generados.

En el sector de la construcción es una prioridad disminuir la huella de carbono presente, puesto que sus desperdicios corresponden al 40% de los desechos sólidos y el 39% de emi-

sión de gases de efecto invernadero, además de consumir el 60% de los recursos extraídos de la tierra ([Pardo et al., 2022](#)). Por esta razón, en Antioquia, Colombia, se han desarrollado guías por parte del Área Metropolitana de Valle de Aburrá –AMVA– para disminuir el impacto generado por este sector por medio de estrategias para la selección de materiales y sistemas constructivos que requieran menos recursos y cuenten con un ciclo de vida más amigable con el medio ambiente ([Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana, 2015](#)).

El incremento de la población mundial y la demanda por nuevos productos para atender las necesidades del consumidor, han generado un incremento económico del 40% en el sector de los plásticos. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos ([OECD, 2022](#)), entre el año 2000 y 2019, la producción de plásticos a nivel global incrementó de 234 millones de toneladas (Mt) a 460 Mt. Consecuente con ello, se incrementó la cantidad de desechos de 156 Mt a 353 Mt, correspondientes a sectores como empaques, productos de consumo y textiles, de los cuales sólo el 9% son reciclados, 50% van a rellenos sanitarios, 19% son incinerados mientras que el 22% restante es desechado, incinerado o liberado de manera no regulada en el ambiente.

Teniendo presente que los plásticos representan un gran porcentaje de los desechos a nivel mundial y generan un impacto negativo en el medio ambiente, se ha establecido la

reducción de la huella de carbono de estos materiales por medio de estrategias que permiten el máximo aprovechamiento de éstos antes de ser desechados, así como la reestructuración de las industrias, basado en el ciclo de vida de los productos, pasando de ser lineales a circulares, con el objetivo de cerrar el ciclo y reducir el consumo de recursos y generación de residuos. Este objetivo no sólo se contempla desde las cadenas de producción, sino desde el diseño e ideación de los productos, donde deberían articularse estrategias de diseño para la sostenibilidad, identificando el ciclo de vida completo de los productos. Adicionalmente, se propone la posibilidad de generar interacciones entre diferentes sectores de la industria que permitan el aprovechamiento máximo de las materias primas y la reducción de residuos con la adopción de estos como materias primas (Velenturf & Purnell, 2021), o la generación de subproductos (Desrochers & Leppälä, 2000).

La presente investigación surge del interés por mitigar el impacto ambiental negativo ocasionado por dos sectores: la industria química y la construcción. Con este propósito, se llevaron a cabo exploraciones para utilizar como materiales de uso arquitectónico un residuo generado por los excedentes industriales indirectos de la empresa ANDERCOL. Esto implicó identificar los excedentes de la empresa y determinar las posibles aplicaciones de sus residuos en el ámbito arquitectónico. Asimismo, se desarrollaron prototipos utilizando dichos excedentes y se analizó su desempeño en el contexto de uso.

Materialidad sostenible

La industria de la construcción tiene una alta demanda de materiales y materias primas no renovables, siendo uno de los sectores que genera más impactos negativos al medio ambiente. Este, demanda el 40% del consumo de las materias primas, el 30% de la energía, emite el 39% de los gases de efecto invernadero y genera el 40% de los desechos sólidos (Pardo et al., 2022).

Adicionalmente, con el objetivo de tener una referencia del estado actual y las metas planteadas, se revisó lo planteado por la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas (AG-ONU, 2015) en el objetivo 12 de los objetivos de desarrollo sostenible, “Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles” (p. 16). De acuerdo con la definición propuesta, el consumo y la producción sostenibles consisten en hacer más y mejor con menos. También se trata de desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental, aumentando la eficiencia de recursos y promoviendo estilos de vida sostenibles.

Entre el año 2000 y el 2017 se presentó un mayor crecimiento de la huella material que del crecimiento poblacional y el crecimiento del producto interno bruto. Esto pone en primer plano que reducir nuestra —huella material— es un imperativo mundial. La huella material se refiere a la cantidad total de materia prima extraída para satisfacer la demanda de consumo final.

Es uno de los indicadores de las presiones que se ejercen sobre el medio ambiente para apoyar el crecimiento económico y satisfacer las necesidades materiales de las personas.

Una de las metas que plantea este objetivo de desarrollo sostenible ([AG-ONU, 2015](#)), es:

[...] lograr la gestión ecológicamente racional de los productos químicos y de todos los desechos a lo largo de su ciclo de vida, de conformidad con los marcos internacionales convenidos, y reducir significativamente su liberación a la atmósfera, el agua y el suelo a fin de minimizar sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente (inc. 12.4, p. 25).

[...] a 2030, reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (inc. 12.5, p. 26).

Economía circular y simbiosis industrial

Los residuos plásticos constituyen actualmente un gran porcentaje de los residuos que más impactan el medio ambiente, debido diferentes factores como la inadecuada disposición de éstos; falta de implementación de estrategias para la reutilización y reciclaje por parte de las industrias, pues sólo el 9% de 353 millones de toneladas de residuos plásticos fueron reciclados en el 2019. Adicionalmente, a los residuos plásticos se les atribuye el 3.4% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero ([OECD, 2022](#)).

La economía circular, entendida como un modelo en el cual se busca mejorar el aprovechamiento de los recursos y reducir la generación de residuos, comprendiendo el ciclo de vida de los productos como un sistema, el cual bien puede interactuar con otros sistemas, debería encaminarse a una estructura cerrada, donde el producto pueda reintegrarse a su cadena productiva sin la necesidad de explotar materia prima nueva ([Green Alliance, 2019](#)). Aunque reducir o reutilizar es la forma ideal de contribuir a un desarrollo sostenible, reprocesar y reciclar, son alternativas para aquellos sectores donde reutilizar no es viable debido a la materia prima empleada o al sistema de manufactura que utilizan.

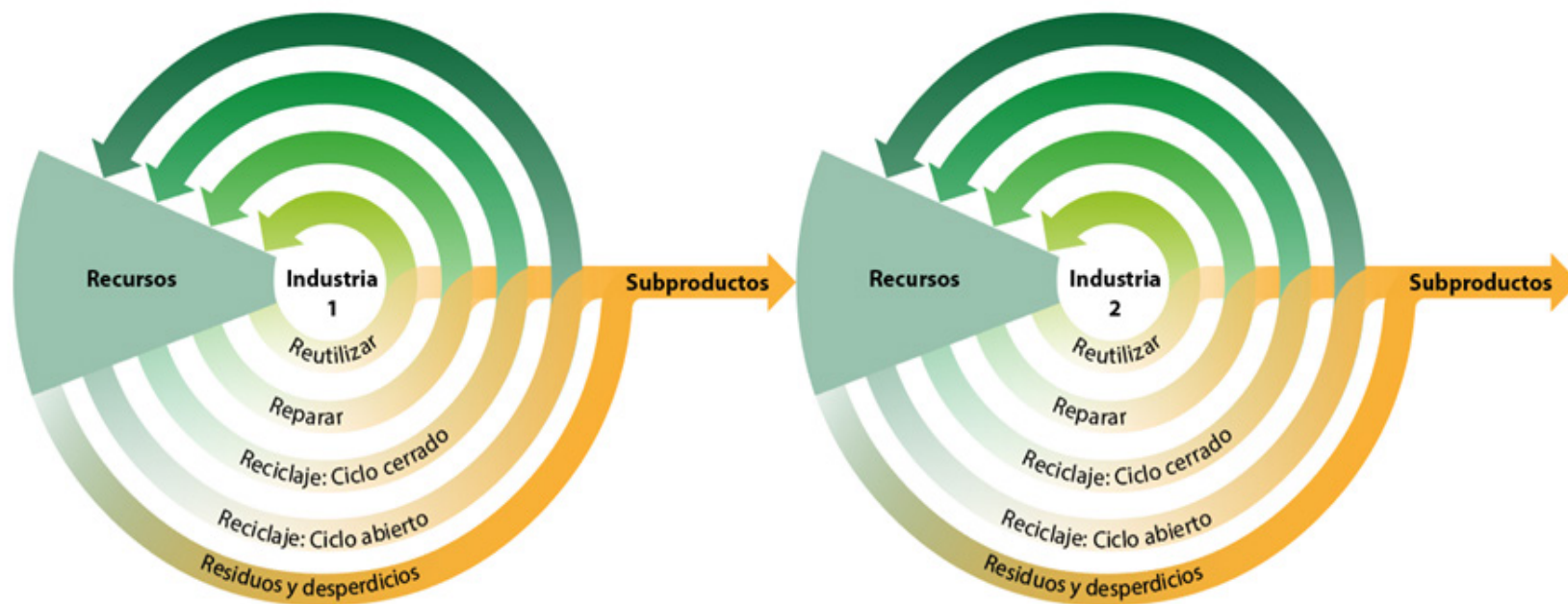
A pesar de que el reciclaje podría considerarse una buena alternativa para reintegrar un producto y desecho a una línea de producción, presenta limitaciones de sostenibilidad dependiendo de las características del material, debido a los recursos adicionales que puede costar transformar ese producto nuevamente en materia prima ([Velenturf & Purnell, 2021](#)). Sin embargo, la emergencia ambiental que ha surgido en las últimas décadas ha provocado que algunos residuos industriales sean vistos como subproductos, que se han convertido en elementos clave para la optimización de materias primas para la producción, propiciando escenarios donde los excedentes de algunos sectores se convierten en insumos esenciales para otros ([Desrochers & Leppälä, 2010](#)).

Además, pensar en la articulación entre sistemas o industrias puede ser una estrategia la cual puede presentar mayores ventajas para reducir el impacto ambiental en algunas categorías de producto, así como el fortalecimiento económico entre industrias (Desrochers & Leppälä, 2010), mejor conocido como simbiosis industrial que, si bien no facilitan el cierre del ciclo donde se origina éste, permiten la conexión entre diferentes sectores de la industria, bajo la operación de sistemas abiertos los cuales pueden mejorar el ciclo de vida basados en el uso de subproductos (Figura 1).

Resina de poliéster insaturada

La Resina de Poliéster Insaturada –RPI– es un polímero termoestable el cual normalmente esta conformado por entrecruzamiento químico de poliéster insaturado y estireno. La solución resultante de esta reacción puede ser curada bajo temperatura y humedad controlada, normalmente haciendo uso de ácidos y óxidos (peróxido de metil etil cetona y cobalto, naftenato de cobre, peróxido de benzoilo, etc.) acelerando el endurecimiento de la resina por medio de una reacción exotérmica (Deopura et al., 2008).

FIGURA 1. Estructura de sistemas basados en subproductos.



Fuente: Basado en Green Alliance (2019).

Tanto la solución como el catalizador suelen ser preparadas y formuladas por industrias químicas según las necesidades del conformado que requiera cada fabricante para diferentes líneas de producto. Como la mayoría de las resinas, la RPI presenta gran resistencia a la degradación química y puede utilizarse pura o cargada con fibras, partículas o láminas de otros materiales (Dodiuk & Goodman, 2014).

Aunque la RPI sola no tiene buena resistencia mecánica, suele ser utilizada como matriz para la conformación de materiales compuestos, puesto que su costo es más favorable que el de una resina epóxica o de éster de vinilo. Adicionalmente, la RPI presenta gran estabilidad y resistencia a ambientes acuáticos, y sus falencias mecánicas, térmicas o eléctricas, pueden mejorarse utilizando el refuerzo adecuado según requiera el producto a fabricar (Newell, 2009). Este amplio espectro de configuraciones, sumado a un bajo costo de producción, hace de la RPI un material con diversas aplicaciones en la industria de bienes e insumos de larga vida útil (construcción, producción naval, pinturas y revestimientos, producción automotriz, etc.).

Tanto en el uso de la resina pura, como en la matriz para materiales compuestos, la resina de poliéster presenta grandes dificultades para ser reciclada. Aunque los residuos de la resina pura en forma de virutas o partículas pueden ser utilizados como carga para preparaciones de la misma resina, los residuos de mayor volumen y geometría diversa no son reintegrados al ciclo.

FIGURA 2. Tipos de excedentes de la fabricación de botones. a) placa perforada por troquel de corte y b) viruta por torneado.



a.



b.

Fuente: Fotografía tomada por los autores.

Por parte de los materiales compuestos, pueden utilizarse digestiones ácidas o combustión de la matriz para recuperar algunos refuerzos de mayor costo (fibras de carbono y algunos metales), pero suelen ser métodos que generan mayor contaminación que el desecho del material o suelen requerir costos adicionales que superan los recursos ahorrados en el reciclaje (Newell, 2009).

Aunque Indubotón SAS cuenta con diferentes presentaciones de residuo de RPI, hay dos tipos que son el excedente directo de dos de sus procesos productivos: a) placa perforada por troquel de corte y b) viruta por torneado (Figura 2).

Estos excedentes posteriormente pueden ser transformados en otras presentaciones como polvo o trozos de malla, que sólo aplican en algunas referencias económica y comercialmente representativas, las cuales la misma compañía logra integrar nuevamente a su ciclo de producción según la demanda. Para las otras referencias de baja rotación comercial, sus residuos se desechan en sus dos presentaciones originales, pues como se mencionó anteriormente, los residuos de materiales termoestables y compuestos suelen requerir procesos complejos para su reúso y reciclaje los cuales pueden representar costos adicionales.

Influencia de los materiales en los espacios interiores

En los espacios interiores los materiales juegan un papel de alta importancia en relación con la experiencia de los usuarios que se encuentran dentro de ellos. Más allá de las propiedades mecánicas de los materiales que permiten la construcción de estructuras y confinamiento de los espacios se encuentran las propiedades ópticas que pueden modificar la percepción que las personas pueden tener de estos, como percibir objetos más grandes o pequeños sólo por ser más brillantes u oscuros respectivamente

Para este proyecto se analizaron y escogieron residuos de la empresa de botones Indubotón SAS, los cuales emplean RPI correspondiente a la referencia Cristalan 823 de Andercol SA (Material suplementario 1) como base para la fabricación de sus productos.

([Egusa, 1983](#); [Farnè, 1975](#)), y las propiedades acústicas que pueden afectar directamente la productividad y el bienestar de los trabajadores cuando se trata de espacios de oficina o ambientes educativos ([Cavanaugh & Wilkes, 2017](#)).

La luz juega un papel fundamental en el uso de los espacios, e incluso, puede ser una forma de condicionarlo o afectar el comportamiento de los usuarios por cambios en su ritmo circadiano. El comportamiento de la luz en los espacios de trabajo, por ejemplo, puede afectar el estado de ánimo y motivación de los trabajadores para realizar una tarea, así como su desempeño al ejecutarla ([Boyce, 2014](#)). Sin embargo, el comportamiento de la luz no sólo se debe a las fuentes de donde proviene, sino también a como los elementos del interior del espacio permiten la reflexión y refracción, modificando la iluminación de todo el entorno.

La interacción de los materiales utilizados para las paredes, cielos y suelos de un espacio juegan un papel fundamental en el comportamiento de la luz en los interiores y no deben interpretarse como componentes aislados, puesto que el confinamiento y la iluminación resultan de la presencia simultánea de ellos. La percepción de los espacios a partir de estas interacciones han sido objeto de múltiples estudios, donde se han encontrado que cielos de colores claros y brillantes presentan una mayor sensación de altura que cuando se utilizan colores oscuros, y cómo el uso de paredes brillantes aporta iluminación al espacio y mejora su percepción de amplitud ([Von Castell et al., 2018](#)).

La Guía Técnica sobre el Aprovechamiento de la Luz Natural de Edificios del [Comite Español de Iluminación –CEI–](#) y el [Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía –IDAE–](#) (2005) recomienda que la reflectancia media de las superficies interiores debe ser al menos de 0.7 para los cielos falsos, 0.5 para las paredes y de 0.2 para el suelo. La reflectancia de mobiliario y equipos debe oscilar preferiblemente entre 0.2 y 0.5 y las superficies brillantes deben evitarse siempre que sea posible, particularmente en o cerca de las superficies de trabajo. Además, debe prestarse especial consideración a las paredes de las ventanas, las cuales deben ser al menos tan reflectantes como las otras paredes, para reducir el contraste entre las ventanas y su fondo inmediato.

La orientación de la fachada de un edificio y, en consecuencia, la ubicación de las ventanas en el mismo, también tienen un impacto significativo en la iluminación interior. Este aspecto es crucial para aprovechar los beneficios de la luz natural y mitigar los inconvenientes asociados a la presencia del sol y su trayectoria ([CEI e IDAE, 2005](#)).

Existen diferentes métricas para cuantificar los ambientes lumínicos interiores, como las que analizan un instante determinado y ciertas condiciones específicas con respecto a la iluminancia, la luminancia o el deslumbramiento (Ministerio de Minas y Energía [[Minminas](#)], 2009) y otras que analizan periodos de tiempo tales como el Factor de luz diurna (Daylight Factor –DF–), o la Iluminancia útil de la luz

diurna (Useful Daylight Illuminance –UDI–), entre otras (Gene-harn, 2013). Para lograr predecir el desempeño lumínico de espacios arquitectónicos no construidos, usualmente se utilizan software y programas computacionales tales como, Radiance, Daysi, Velux, Avallare, Lightsolve, Spektro, Diva4Rhino, entre otros (Giraldo, 2018).

Por otro lado, la comodidad auditiva desempeña un papel fundamental en los espacios de oficina, ya que afecta directamente la productividad y el bienestar de los trabajadores (Cavanaugh & Wilkes, 2017). Según la normativa ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 de la Sociedad Acústica de América (ASA, 2010), se establece que un tiempo de reverberación máxima de 0.7 segundos debe ser alcanzado para garantizar un entorno acústico óptimo. El cálculo del tiempo de reverberación se realiza mediante el método de Sabine, el cual tiene en cuenta la geometría y las propiedades acústicas de los materiales presentes en el espacio (Kuttruff, 2009).

Entre las superficies del entorno de oficina, el cielo falso se destaca por su alto potencial para la instalación de materiales de absorción acústica (Cavanaugh & Wilkes, 2017). Debido a su extensión y ubicación estratégica, puede contribuir significativamente a la reducción de la reverberación y mejorar la calidad del sonido en el espacio de trabajo. Por lo tanto, es esencial considerar el cielo falso como un elemento clave en la planificación y diseño acústico de oficinas, con el fin de garantizar un ambiente sonoro favorable y promover el bienestar de los empleados.

Además, para lograr una adecuada comodidad auditiva en los espacios, es importante conocer el Coeficiente de Reducción de Ruido (Noise Reduction Coefficient –NRC–) de los cielos falsos (Cavanaugh & Wilkes, 2017). El NRC es una medida que indica la capacidad de un material para absorber el sonido y reducir la reverberación. Al seleccionar cielos falsos con un alto NRC, se puede mejorar aún más la calidad acústica del entorno de oficina, minimizando los niveles de ruido y creando un ambiente de trabajo más tranquilo y productivo.

Considerando lo presentado anteriormente, se propone realizar una primera exploración utilizando el residuo troquelado de la elaboración de botones para la elaboración de cielos falsos arquitectónicos con propiedades lumínicas y acústicas.

CASO DE ESTUDIO

Por una parte, la empresa química ANDERCOL, actualmente presenta un reto en cuanto a la circularidad de sus procesos. Dado que en algunos casos no logra reutilizar excedentes de procesos o completar su ciclo de vida, como sucede en el caso de los materiales termoestables y compuestos de matriz polimérica. Particularmente, el RPI está hecho a partir de materias primas no renovables que, al curar, terminan generando enlaces químicos muy fuertes que impiden su degradación y hacen que aprovechar sus residuos requiera muchos recursos que no son sostenibles para las empresas que emplean este material.

La empresa Indubotón SAS es una de las industrias que más utiliza la RPI en diferentes procesos de manufactura para la fabricación de botones para prendas. A lo largo de su fabricación se generan diferentes tipos de residuos que pueden variar tanto en su forma como en su composición, pues en algunos casos puede tratarse de matrices de RPI con fibras u otros tipos de materiales. Sin embargo, en cuanto a la forma del residuo suelen encontrarse como virutas, resultantes de un proceso por arranque de material a barras cilíndricas, o como láminas con agujeros circulares resultantes de un troquel de corte. De la última forma, el diámetro de sus perforaciones puede variar en cada lámina dependiendo de la referencia de botón que se requiera. Por ello, los residuos pueden tener tantos acabados como referencias de botón soliciten, y sus cantidades pueden variar de acuerdo con las solicitudes de los clientes, lo que dificulta aún más los procesos de reciclaje o reutilización, aumentando la huella de carbono de esta industria.

Aunque estos residuos desde su composición química pueden ser complejos para degradarse, la forma de sus residuos puede significar un potencial para convertirse en insumos o productos para otras industrias.

METODOLOGÍA

La metodología a través de la cual se realizó la investigación es cuantitativa de tipo exploratorio y se compone principalmente de las cinco etapas descritas a continuación.

Etapas 1: Selección del residuo e identificación de retos y posibilidades

La selección del material se articula con la estructura general de las estrategias recomendadas para facilitar el cumplimiento del ciclo del material fundamentada en la economía circular. Aunque la viruta generada dentro de uno de sus procesos es fácil de integrar al ciclo para la fabricación de los mismos botones, también puede ser una materia prima que puede incorporarse como cargas en el desarrollo de nuevos materiales para la construcción. Sin embargo, estos procesos implican el consumo de mayor cantidad de recursos, como agua y energía, para su conformación.

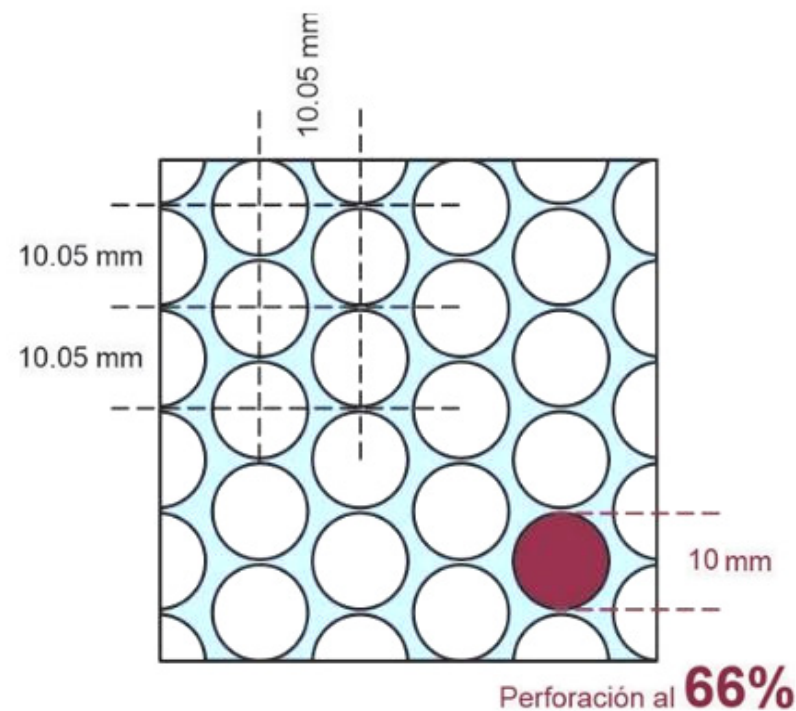
Por otra parte, el residuo del troquel es un producto que cuenta con una presentación muy cercana al producto final para aplicaciones de arquitectura interior, donde el único proceso adicional es recortar estas láminas perforadas según las dimensiones deseadas, teniendo presente que la disposición de este residuo mantiene un ancho constante de 560 mm y una longitud indeterminada, dependiente del encargo de producción. Adicionalmente, debido al estado de curado en el que la RPI se encuentra al final del proceso, la configuración formal de la lámina puede ajustarse a diferentes requerimientos o simplemente disponerse en el suelo y redimensionarse según se requiera sin la necesidad de implementar equipos de alto costo adicional.

Aunque la literatura sugiere que la reutilización y la remanufactura son los dos caminos que menor impacto pueden generar en el ciclo de vida de un producto (Green Alliance, 2019), para este caso se consideró una ruta alterna que involucra el uso de un subproducto de la industria de botones el cual permite la articulación con la industria de la construcción bajo la idea del reuso pero en un sistema abierto, donde los recursos necesarios para presentación final son mínimos e incluso podrían implementarse al final de la línea de producción de Indubotón SAS.

Etapa 2: Caracterización y medición del residuo

Una vez definido que se realizarían exploraciones sobre la aplicación del material residual como cielos falsos arquitectónicos, el siguiente paso fue realizar una caracterización y medición del material. Se analizaron principalmente tres variables: la forma del residuo, las propiedades ópticas y las propiedades acústicas.

FIGURA 3. Dimensiones, patrón y porcentaje de perforación del residuo.

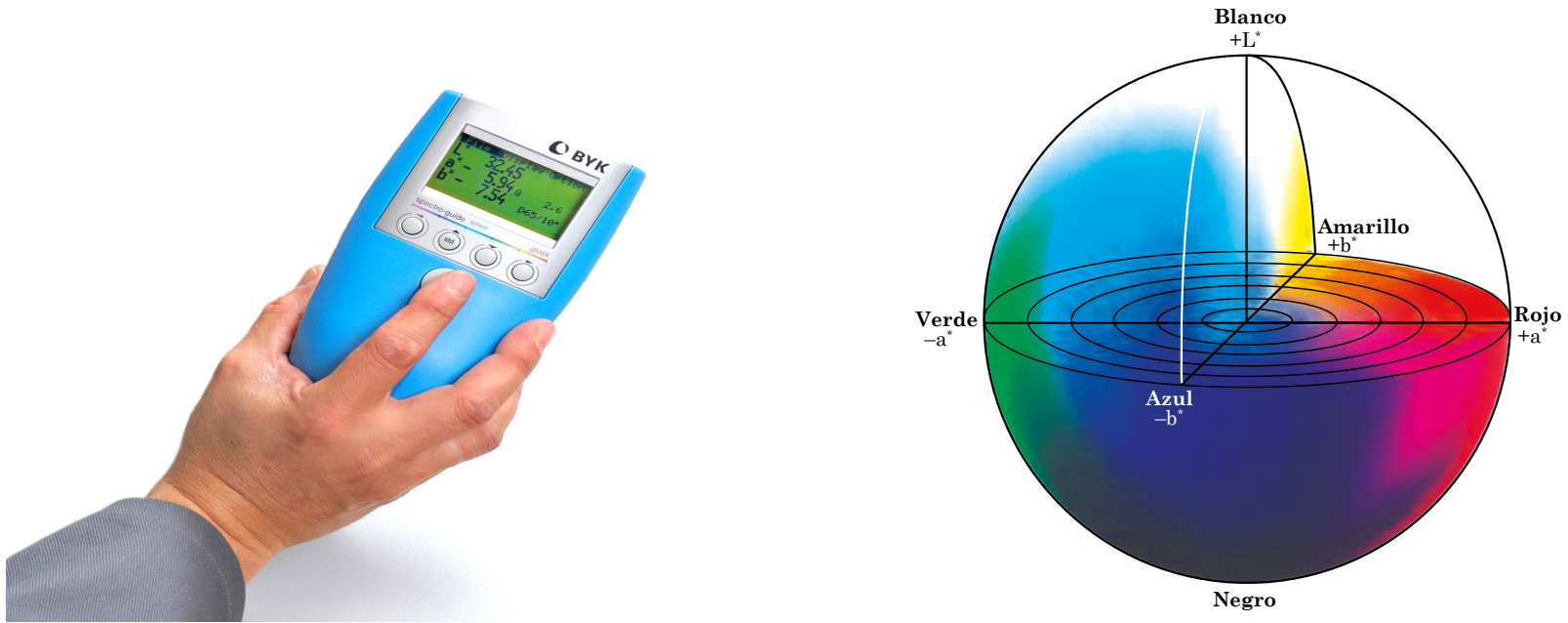


Fuente: Imagen realizada por los autores.

FIGURA 4. Construcción de las características ópticas del material.

a. BYK Gardner spectro-guide 45/0 Gloss.

b. Espacio de color CIELab.



a.

b.

Fuente: Imagenes adaptadas de BYK-Gardner GmbH (s.f.).

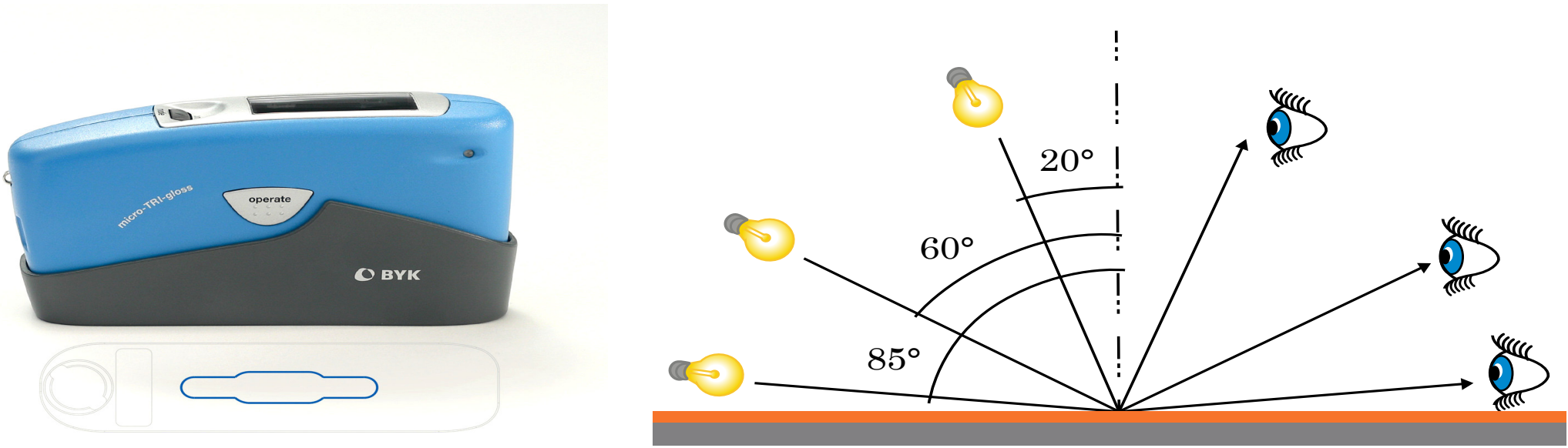
- El residuo tiene una forma laminar perforada, con un ancho fijo de 560 mm dado por la máquina y un largo indeterminado definido por el encargo de producción. El porcentaje de perforación de la lámina, una vez extraídos los botones es del 66% de vacío y 34% de lleno aproximadamente, como se muestra en la Figura 3.

- Con respecto a las propiedades ópticas del material se realizaron principalmente dos tipos de mediciones. Las características espectrales del color de las muestras a través de un espectrofotómetro y las características de brillo del material a través de un bríllómetro de tres ángulos. En ambos instrumentos se configuró el iluminador D65 que es el más parecido al conjunto de radiaciones provenientes del sol y se realizaron tres disparos cada vez para tomar los datos promedio resultantes de las tres tomas.

FIGURA 5. Construcción de las características ópticas del material.

a. Bríllómetro de tres ángulos micro-gloss BYK.

b. Ángulos en el que mide el bríllómetro la luz reflejada especularmente.



a.

b.

Fuente: Imagenes adaptadas de BYK-Gardner GmbH (s.f.).

El espectrofotómetro arroja como resultado las coordenadas de color para un espacio de color $L^*a^*b^*$, también referido como CIELAB. Donde L^* = luminosidad, a^* = coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde) y b^* = coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul) (Figura 4).

Posteriormente para cargar el material al algoritmo de simulación de iluminación natural se usó un convertidor a RGB.

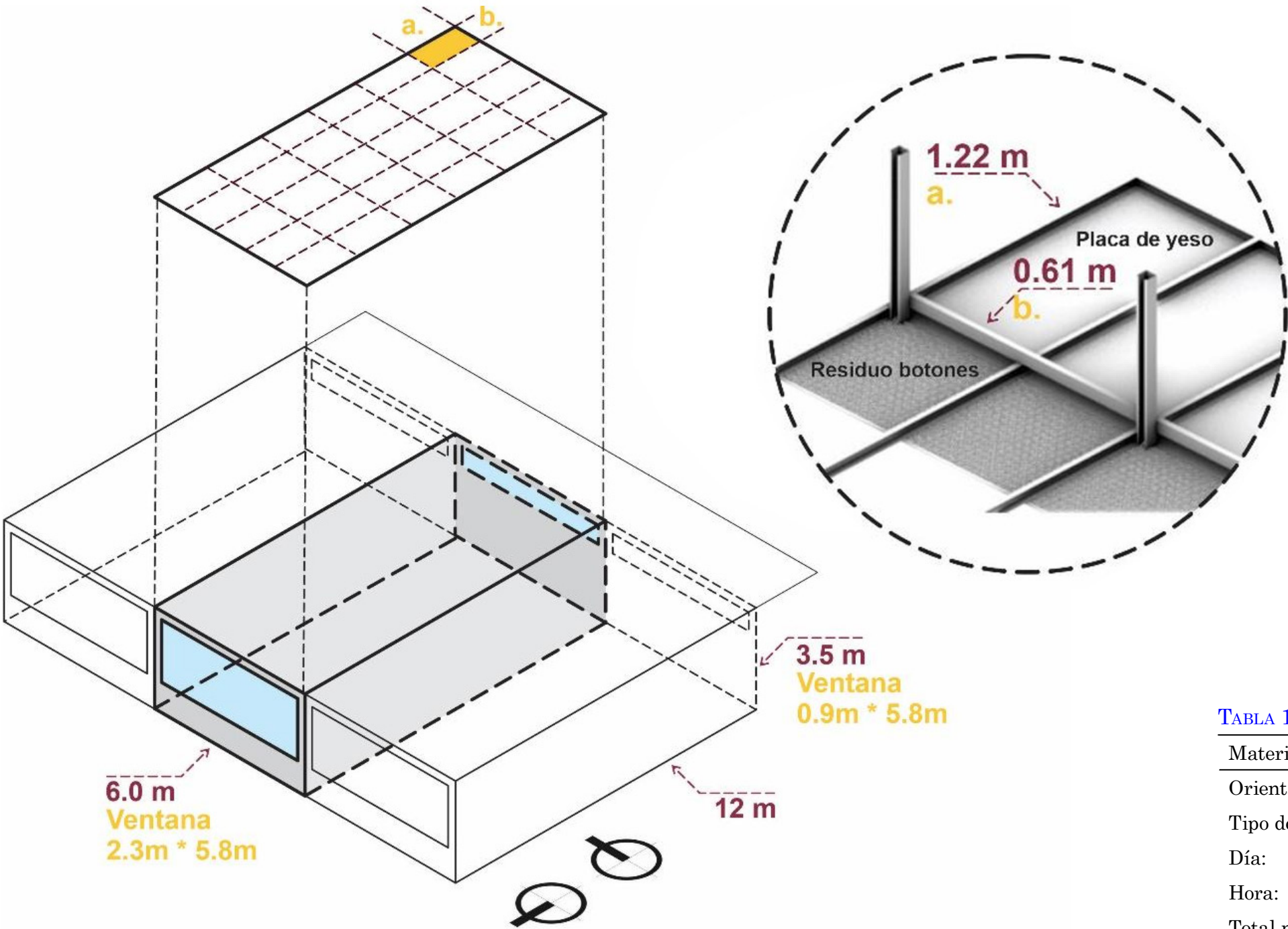
El bríllómetro miden la reflectancia especular de las superficies y devuelven la medida en unidades de brillo: UB o GU (Gloss Units). Esta escala GU se basa en la reflectancia especular para un ángulo determinado (20°, 60° y 85°) (Figura 5).

- Para las propiedades acústicas del material se consideró el índice de perforación del panel y sobre él, dos pulgadas de lana mineral de roca separadas por un fieltro. Se utilizaron referencias comerciales para proyectar un NRC del sistema resultante. Se debe aclarar que para futuras investigaciones se recomienda hacer mediciones sobre prototipos a escala.

Etapas 3: Propuesta de aplicación y construcción del modelo hipotético

Con el objetivo de medir el desempeño y las posibilidades de aplicación del residuo como cielo falso arquitectónico se construyó un modelo hipotético de 6 m de ancho $\times$ 12 m de largo y 3.5 m de alto. Sobre este modelo se construyó una subestructura metálica de 0.6 $\times$ 1.22 m, dimensiones usualmente utilizadas para instalar placas de yeso o fibrocemento en cielo, pensando en la posible articulación del uso del material propuesto con otros materiales ya utilizados en la construcción y utilizar sistemas de anclaje ya existentes. En ese orden de ideas y considerando que el residuo generado no es homogéneo en color ni forma, sino que depende de la cantidad de botones solicitados, se podría pensar en aplicaciones parciales o zonificadas dentro de ambientes de oficinas sobre áreas que tengan requerimientos particulares en iluminación o absorción acústica. En la [Figura 6](#) se ilustran las condiciones del modelo base.

FIGURA 6. Dimensiones y disposición del modelo hipotético base.



Fuente: Imagen diseñada por los autores.

Etapas 4: Simulación computacional y cálculos

Una vez generada la propuesta de instalación de los paneles de cielo se realizaron simulaciones computacionales y cálculos para determinar el desempeño lumínico y acústico del sistema propuesto. A continuación, se presentan los parámetros utilizados para cada uno de los casos.

• *Desempeño lumínico*

Se realizaron simulaciones computacionales en el software Rhino 3D, el plugin Grasshopper y los complementos Ladybug y Honeybee. El motor de cálculo utilizado fue Radiance. Se realizaron simulaciones estáticas de niveles lumínicos en 144 escenarios distintos respondiendo a la variación y combinación de los siguientes parámetros ([Tabla 1](#)).

TABLA 1. Parámetros variables para las simulaciones computacionales.

Material:	Material 0	Material A	Material B	Material C	4
Orientación:	Norte	Occidente			2
Tipo de cielo:	Quibdó	Riohacha			2
Día:	jun-21	sep-21	dic-21		3
Hora:	9:00 hr	12:00 hr	15:00 hr		3
Total número de simulaciones					144

Fuente: Autores.

- *Materiales:* Se tomó como material 0 una placa en yeso convencional para tener una línea base de referencia. Los otros tres materiales son unos de los colores más demandados en botones según información suministrada por la empresa.
- *Orientación:* Se tomaron dos orientaciones, una que recibirá radiación solar directa en algunos momentos y otra que recibirá principalmente radiación difusa.
- *Tipo de cielo:* Se construyeron dos tipos de cielo a partir de dos archivos climáticos. El de Quibdó, representando un cielo predominantemente nublado con brillo solar mensual entre 80 y 135 horas y el de Riohacha, representando un cielo predominantemente despejado con brillo solar mensual entre 200 y 262 horas ([Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales \[IDEAM\], s.f.](#))
- *Día:* Se tomaron las fechas extremas de la eclíptica solar (los dos solsticios y un equinoccio).
- *Hora:* Se tomó una hora en la mañana, una al medio día y una en la tarde.

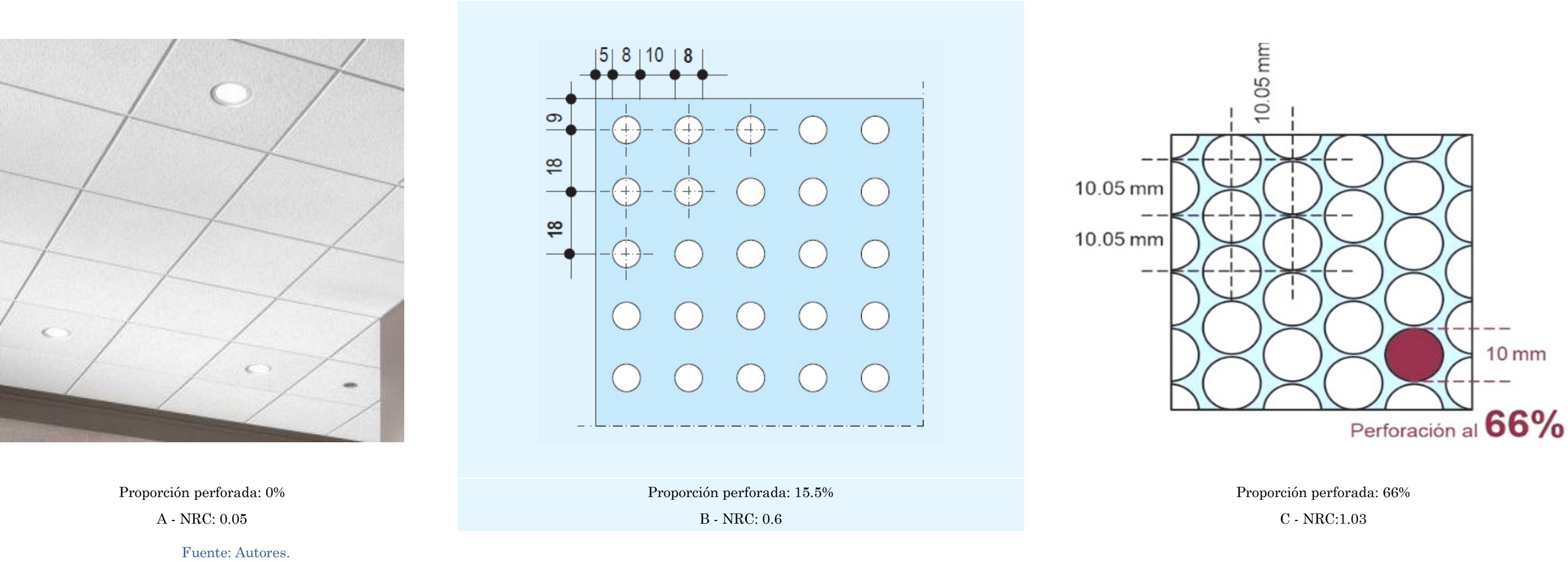
• *Desempeño acústico*

Se realizaron cálculos matemáticos basados en la fórmula de cálculo del tiempo de reverberación propuesta por Sabine. Asumiendo que los muros están hechos en ladrillo revocado y pintado, el piso en porcelanato y el cielo variará entre placa de yeso convencional, perforada (referencia comercial) y el panel propuesto elaborado con el residuo de los botones.

Etapas 5: Procesamiento de datos

En esta última etapa se tomaron los resultados de las simulaciones y los cálculos y se procesaron a través de gráficas y tablas con el objetivo de poner el paralelo el desempeño de un cielo falso convencional elaborado en yeso y el panel de cielo propuesto elaborado con el residuo. Para el análisis de los resultados se debe con-

FIGURA 7. Coeficiente de absorción acústica de los tres paneles a probar.



RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la presente investigación agrupados en tres secciones. 1. El resultado de las mediciones de las propiedades ópticas de los materiales excedentes de la fabricación de botones, 2. Los resultados de las simulaciones de iluminación natural y 3. Los resultados de los cálculos de tiempo de reverberación.

siderar que, con respecto al ambiente lumínico, según lo normatizado por el RETILAP, para oficinas abiertas debe alcanzarse mínimo 300 lux y máximo 1000 lux y con respecto al ambiente acústico, según lo expuesto en la norma ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1 de la [ASA \(2010\)](#) se debe alcanzar un tiempo de reverberación máxima de 0.7 s.

Características ópticas de los materiales

En la [Tabla 2](#) se presentan los resultados obtenidos de las mediciones de las propiedades ópticas de los residuos más usualmente generados en la industria de botones y se ponen en paralelo con una placa de yeso utilizada tradicionalmente en los cielos falsos. Se puede observar que la placa de yeso correspondiente al M0 presenta el índice de reflexión más alto, seguido del MC y del MA.

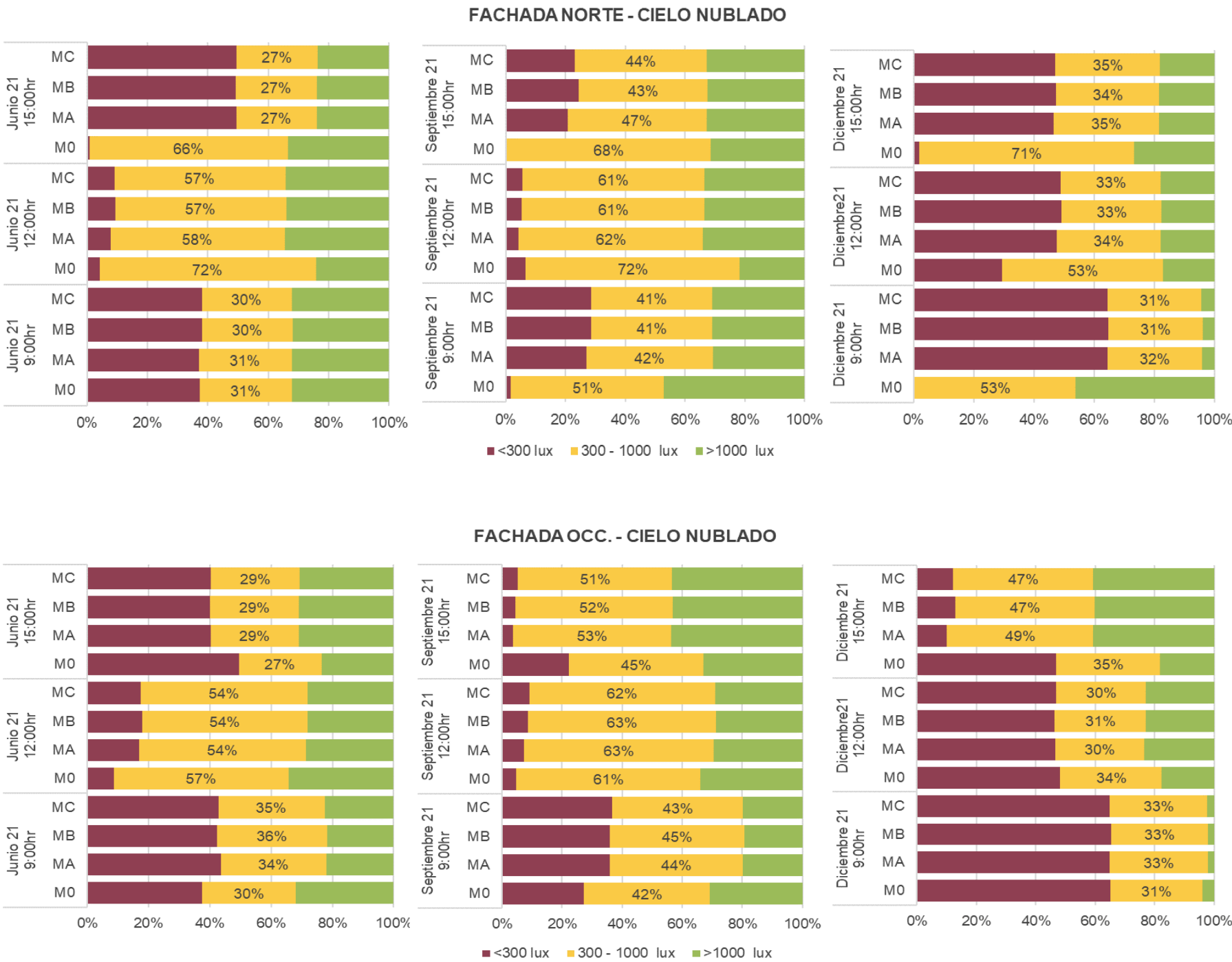
Con respecto a la especularidad para los tres (3) materiales (A, B y C) se puede observar que presentan mayores reflejos cuando la radiación incide de forma diagonal que perpendicular a la superficie.

TABLA 2. Características ópticas de los materiales RPI.

	M0	MA	MB	MC
				
Descripción	Placa de yeso blanca	Blanco perlado rayas	Marrón veteado	Crema veteado
L (Blanco / Negro)	92.8	68.9	68.2	75.7
a (Verde / Rojo)	−1.02	−1.4	3.3	−1.18
b (Amarillo / Azul)	−1.7	−3.1	6.6	1
R (red) G (green) B (blue)	234.234.238	162.169.175	178.163.151	185.187.184
Índice de reflexión RGB	0.92 0.92 0.93	0.64 0.66 0.69	0.7 0.64 0.59	0.73 0.74 0.72
Reflejo especular 20°	-	0.647	0.651	0.526
Reflejo especular 60°	-	0.95	0.906	0.783
Reflejo especular 85°	-	0.966	0.863	0.779

Fuente: Autores.

FIGURA 8. Rangos niveles lumínicos con Cielo nublado.



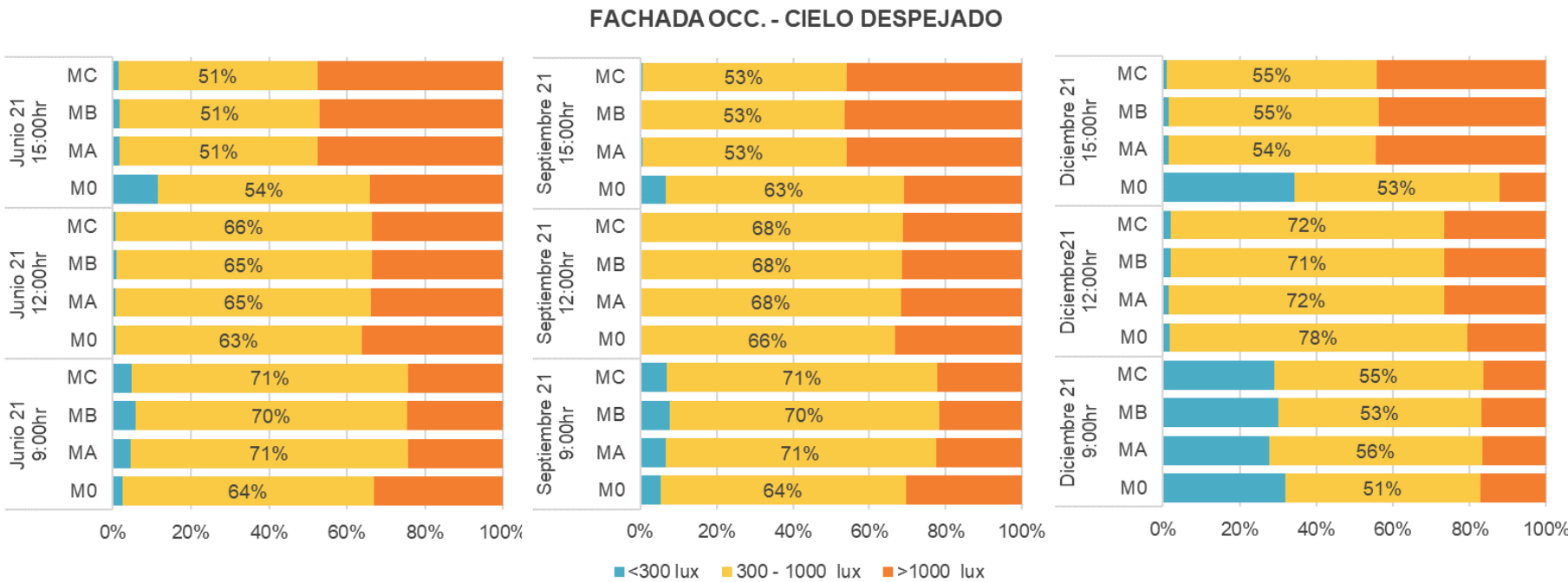
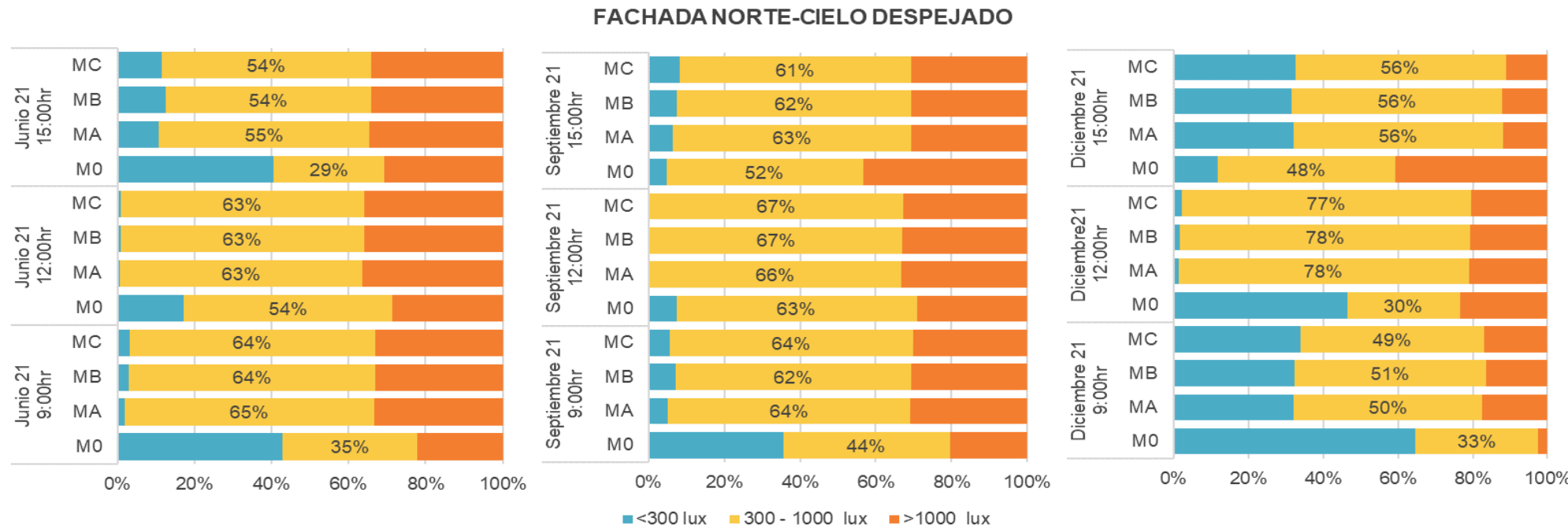
Fuente: Autores.

Desempeño lumínico del panel

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones de iluminación natural para los escenarios planteados ([Figura 8](#); [Figura 9](#)).

- Para la fachada norte con cielo nublado el material M0 presenta un mejor desempeño que los demás materiales especialmente durante las horas de la tarde donde puede incluso duplicar el porcentaje de tiempo con niveles lumínicos deseados. Mientras que al medio día y en las mañanas el desempeño lumínico del M0 puede ser muy similar a los demás o ser superior hasta en un 22%.
- El M0 demuestra funcionar mejor en el aumento de los niveles lumínicos cuando la radiación solar no es directa. Cuando la radiación solar es directa los niveles lumínicos alcanzados son muy semejantes entre los cuatro materiales.
- Con respecto a la fachada occidente con cielo nublado, se puede identificar que el material M0 presenta un desempeño muy semejante o inferior a los demás materiales, especialmente en las horas de la tarde cuando hay radiación solar directa. El MA presentó el mejor desempeño en las horas de la tarde y el MB al medio día y durante la mañana.
- Para las condiciones de cielo despejado, fachada norte, el material M0 presenta el desempeño lumínico más desfavorable con altos porcentajes de espacio por debajo de los 300 lux o por encima de los 1000 lux. Los otros materiales presentan un desempeño muy similar siendo el MA ligeramente mejor durante las horas de la tarde y la mañana y el MB al medio día.

FIGURA 9. Rangos niveles lumínicos con Cielo nublado.
Fuente: Autores.



- Cuando la radiación solar se presenta de forma directa en el mes de junio el material M0 presenta el mejor desempeño al medio día, pero el peor en la mañana y en la tarde indicando que su especularidad en incidencias diagonales puede ser mucho menor que la del material reutilizado.

- Se puede identificar que, para la fachada occidente con cielo despejado, existe mayor posibilidad de experimentar incomodidad visual por excesos lumínicos que por niveles insuficientes. En este último escenario los desempeños de todos los materiales fueron muy semejantes. Durante las tardes se presentaron variaciones hasta de un 3%, al medio día de hasta 6% y en la mañana de hasta 6%. Considerando que el material M0 es el que presenta más tendencia a generar niveles lumínicos bajos.

Desempeño acústico del panel

En la [Tabla 3](#) se presentan los resultados de los cálculos de tiempo de reverberación con los tres (3) materiales de cielo propuestos.

- Se puede observar que el espacio con cielo falso A en placa de yeso tradicional, presenta un tiempo de reverberación de 4.9 segundos, muy por encima de lo sugerido por la normativa y por tanto no permitiría la inteligibilidad de la palabra.
- El espacio con cielo falso B presenta una disminución considerable del tiempo de reverberación llegando a los 1.46 segundos.

- El espacio con el cielo falso C, al tener más área perforada permite que mayor cantidad de ondas sonoras lleguen al material absorbente, disminuyendo su tiempo de reverberación hasta 1 segundo. Si bien aún no se alcanza el tiempo de reverberación sugerido por la normativa que es de 0.7 s, se acerca mucho y aplicando otras estrategias de absorción sobre otras superficies o abriendo las ventanas, fácilmente se llegará a los niveles deseados. Es decir que en este caso el cielo falso elaborado con material reciclado, presenta un desempeño muy superior a la placa de yeso tradicional y ligeramente superior al panel de yeso perforado comercial.

CONCLUSIONES

- Es posible reutilizar los residuos excedentes de la elaboración de botones cómo materia prima para la generación de cielos falsos arquitectónicos con propiedades lumínicas y acústicas. Que además pueden ser modulados con sistemas de cielos falsos tradicionales en yeso con el objetivo de modificar los microambientes lumínicos y acústicos dentro de espacios de altas complejidades como lo son los espacios de oficina y de ambientes educativos.
- Una vez comprobado el potencial de utilización del residuo como cielo falso arquitectónico se debe construir un prototipo a escala y realizar ensayos de laboratorio.
- Para la implementación del subproducto como cielo falso, se deberá comprobar que cumpla con estándares de seguridad como material arquitectónico, específicamente su capacidad de retardar el fuego, pues la RPI es un plástico de alta flamabilidad que podría comportarse de manera adversa en un incidente con presencia de fuego.
- La configuración de las industrias como sistemas híbridos, cerrados y abiertos, pueden ser una alternativa para de reducir el impacto ambiental de los materiales que presentan mayor complejidad para su disposición final o reintegración al ciclo. Para ello, la reconfiguración de las industrias debe partir de la búsqueda de otras empresas con las que puedan conectarse y establecer una simbiosis desde el momento de concepción del producto, diseñando y desarrollando tanto el producto final de la empresa que lo manufactura, así como sus subproductos, reduciendo la cantidad de residuos generados y los procesos de producción.

TABLA 3. Cálculo tiempo de reverberación con tres materiales de cielo falso

Volumen del espacio (m³)		468					
Materiales	Área del material	Coeficientes de absorción			Producto (área × coeficiente)		
		125 Hz	500 Hz	2000 Hz	Total 125	Total 500	Total 2000
Muros en ladrillo revocado y pintado	114.8	0.01	0.02	0.04	1.1	2.3	4.6
Cerramiento en vidrio templado laminado	11.2	0.18	0.04	0.02	2.0	0.4	0.2
Cielo en placa de Yeso	72.0	0.10	0.05	0.03	7.2	3.6	2.2
Piso (linóleo, vinilo)	72.0	0.02	0.03	0.03	1.4	2.2	2.2
Personas de pie	20.0	0.2	0.3	0.4	3.6	5.4	7.2
Total	270.0	0.10	0.08	0.10	15.4	13.9	16.3
Tiempo de Reverberación					4.89	5.42	4.61
Tiempo de Reverberación Promedio					4.97		

Materiales	Área del material	Coeficientes de absorción			Producto (área × coeficiente)		
		125 Hz	500 Hz	2000 Hz	Total 125	Total 500	Total 2000
Muros en ladrillo revocado y pintado	114.8	0.01	0.02	0.04	1.1	2.3	4.6
Cerramiento en vidrio templado laminado	11.2	0.18	0.04	0.02	2.0	0.4	0.2
Cielo en Lana de vidrio 50mm con cubierta perforada 15.5%	72.0	0.55	0.60	0.55	39.6	43.2	39.6
Piso (linóleo, vinilo)	72.0	0.02	0.03	0.03	1.4	2.2	2.2
Personas de pie	20.0	0.2	0.3	0.4	3.6	5.4	7.2
Total	270.0	0.19	0.19	0.20	47.8	53.5	53.8
Tiempo de Reverberación					1.58	1.41	1.40
Tiempo de Reverberación Promedio					1.46		

Materiales	Área del material	Coeficientes de absorción			Producto (área × coeficiente)		
		125 Hz	500 Hz	2000 Hz	Total 125	Total 500	Total 2000
Muros en ladrillo revocado y pintado	114.8	0.01	0.02	0.04	1.1	2.3	4.6
Cerramiento en vidrio templado laminado	11.2	0.18	0.04	0.02	2.0	0.4	0.2
Cielo en placa RPI - Perforada al 66% (+ 50mm lana mineral de roca)	72.0	0.61	1.15	1.01	43.9	82.8	72.7
Piso (linóleo, vinilo)	72.0	0.02	0.03	0.03	1.4	2.2	2.2
Personas de pie	20.0	0.2	0.3	0.4	3.6	5.4	7.2
Total	270.0	0.20	0.30	0.29	52.1	93.1	86.9
Tiempo de Reverberación					1.45	0.81	0.87
Tiempo de Reverberación Promedio					1.04		

Fuente: Autores.

REFERENCIAS

- ASA. (2010). Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools [ANSI/ASA S12.60-2010/Part 1]. https://successforkidswithhearingloss.com/wp-content/uploads/2012/01/ANSI-ASA_S12.60-2010_PART_1_with_2011_sponsor_page.pdf
- AG-ONU. (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible [A/RES/70/1]. <https://www.un.org/es/ga/70/resolutions.shtml>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad Pontificia Bolivariana. (2015). *Guía 4. Guía para el diseño de edificaciones sostenibles*. UPB. https://www.metropol.gov.co/ambiental/Documents/Construccion_sostenible/Guia-4-GCS4EdificacionesSostenibles.pdf
- Boyce, P. (2014). *Human factors in lighting* [3 ed.]. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16707>
- BYK-Gardner GmbH. (s.f.). *Líder en soluciones de control y ensayo*. <https://www.byk-instruments.com/es/>
- Cavanaugh, W. & Wilkes, J. (Eds.). (1999). *Architectural Acoustics: Principles and Practice*. John Wiley & Sons.
- CEI e IDAE. (2005). *Guía Técnica. Aprovechamiento de la Luz Natural en la iluminación de Edificios*. IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. <https://www.idae.es/publicaciones/guia-tecnica-aprovechamiento-de-la-luz-natural-en-la-iluminacion-de-edificios>
- Deopura, B., Alagirusamy, R., Joshi, M. & Gupta, B. (2008). *Polyesters and Polyamides*. Woodhead Publishing.
- Desrochers, P. & Leppälä, S. (2010). Industrial symbiosis: Old wine in recycled bottles? Some perspective from the history of economic and geographical thought. *International Regional Science Review*, 33(3), 338–361. <https://doi.org/10.1177/0160017610375441>
- Dodiuk, H. & Goodman, S. (2014). *Handbook of Thermoset Plastics* [3 ed.]. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-09694-1>
- Egusa, H. (1983). Effects of brightness, hue, and saturation on perceived depth between adjacent regions in the visual field. *Perception*, 12(2), 167–175. <https://doi.org/10.1068/p120167>
- Farnè, M. (1977). Brightness as an indicator to distance: relative brightness per se or contrast with the background? *Perception*, 6(3), 287–293. <https://doi.org/10.1068/p060287>

- Gene-Harn, L. (2013). Evaluating the Assessment of Daylight Performance Parameters of Office in the Tropics [*Paper*]. Universiti Malaysia. https://www.academia.edu/20415260/Evaluating_the_Assessment_of_Daylight_Performance_Parameters_of_Office_in_the_Tropics?uc-g-sw=7051565
- Giraldo, V. (2018). Ensayo metodológico para la evaluación simultánea de suficiencia lumínica, probabilidad de deslumbramiento y efectos no visuales en la salud con iluminación natural en oficinas [*Tesis Maestría*]. Universidad de San Buenaventura.
- Green Alliance. (2019). *Building a circular economy: How a new approach to infrastructure can put an end to waste*. Resource Recovery from Waste –RRfW–. https://green-alliance.org.uk/wp-content/uploads/2021/11/Building_a_circular_economy.pdf
- Kuttruff, H. (2009). *Room Acoustics* [5 ed.]. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482266450>
- Newell, J. (2008). *Essentials of modern materials science and engineering*. Pearson.
- OECD. (2022). *Global Plastics Outlook: Economic Drivers, Environmental Impacts and Policy Options*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/de747aef-en>
- Pardo, N., León, G. y Acevedo, H. (2022). Impactos ambientales asociados a la huella de carbono y la energía incorporada del ciclo de vida de una edificación en Medellín. *Informes de la Construcción*, 74(565), 1–11. <https://doi.org/10.3989/ic.82758>
- República de Colombia. DANE. (2020). Cuenta ambiental y económica de flujos de materiales – residuos sólidos [*Boletín Técnico*]. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Bt-Cuenta-residuos-2018p.pdf
- República de Colombia. IDEAM. (s.f.). *Atlas Climatológico de Colombia*. <http://www.ideam.gov.co/AtlasWeb/index.html>
- República de Colombia. Minambiente. (2020). *Informe nacional de residuos o desechos peligrosos en Colombia 2020*. <https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/2022-08/InformeNacionalRespel2020.pdf>
- República de Colombia. Minminas. (2009). *Resolucion 181331*, Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público Retilap y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 47.447, agosto 20 de 2009. https://www.minenergia.gov.co/documents/3900/RES181331_2009.pdf
- Velenturf, A. & Purnell, P. (2021). Principles for a sustainable circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1437–1457. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.018>
- Von Castell, C., Hecht, H. & Oberfeld, D. (2018). Which Attribute of Ceiling Color Influences Perceived Room Height? *Human Factors*, 60(8), 1228–1240. <https://doi.org/10.1177/0018720818789524>

Elizabeth Parra Correa es magister en bioclimática, Arquitecta. Hombre, proyecto y ciudad - Factores humanos y bioclimática. Universidad San Buenaventura (Colombia). <https://orcid.org/0000-0003-0644-0886>

Román Bonilla Sánchez es diseñador industrial. Hombre, proyecto y ciudad - Tecnología. Universidad San Buenaventura (Colombia). <https://orcid.org/0000-0002-2026-1465>