

# Textiles y PET reciclados con cualidades absorbentes del sonido para el mejoramiento de diversos parámetros acústicos en un aula

## Recycled textiles and PET with sound absorbing qualities for the improvement of various acoustic parameters in the classroom

## Têxteis reciclados e PET com qualidades de absorção de som para a melhoria de vários parâmetros acústicos em sala de aula

Jesús Martínez Rangel<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-7723-6551, Laura A. Lancón Rivera<sup>2</sup> ORCID 0000-0001-9403-7186, Ernesto R. Vázquez Cerón<sup>3</sup> ORCID 0000-0001-9293-0843

<sup>1</sup> Estudiante de la maestría en Diseño Bioclimático de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco (UAM-A)

<sup>2</sup> Profesora Investigadora del Departamento de Procesos y Técnicas de Realización de la UAM-A

<sup>3</sup> Profesor Investigador del Departamento de Electrónica de la UAM-A

Correo de contacto: [al2212800445@azc.uam.mx](mailto:al2212800445@azc.uam.mx)

### Resumen

Existen en el mercado variedad de materiales reciclados con aplicaciones acústicas, que son utilizados para mejorar la calidad sonora de diversos recintos y evitar el uso de otros materiales comerciales que representan un riesgo a la salud. Sin embargo, en Latinoamérica, específicamente en México, aún son desconocidas por muchas empresas las cualidades acústicas que pueden tener los materiales reciclados que obtienen a través de diversos desechos. A través de un tubo de impedancias se ha cuantificado el coeficiente de absorción de dos materiales reciclados basados en fibras textiles y de botellas de PET respectivamente, adquiridos a través de dos empresas que destinan el uso de estos materiales para cuestiones ajenas al acondicionamiento acústico. Por medio de un *software* especializado se han realizado simulaciones acústicas aplicando dichos materiales reciclados para determinar el impacto de éstos en diversos parámetros acústicos como el tiempo de reverberación, inteligibilidad de la palabra, definición, entre otros. El uso de ambos materiales acercó a los diversos parámetros a valores aceptables en un aula, donde es primordial el entendimiento del habla, mejorando la calidad acústica del espacio.

**Palabras clave:** materiales absorbentes, materiales reciclados, caracterización acústica, calidad acústica, parámetros acústicos

### Abstract

There are a variety of recycled materials on the market with acoustic applications, which are used to improve the acoustic quality of various rooms and avoid the use of other commercial materials that represent a health risk. However, in Latin America, specifically in Mexico, many companies are still unaware of the acoustic qualities that the recycled materials obtained through various wastes materials. Through an impedance tube, the absorption coefficient of two recycled materials based on textile fibers and PET bottles respectively, acquired through two companies that use these materials for purposes other than acoustic conditioning, has been quantified. Through specialized software, acoustic simulations have been carried out using these recycled materials to determine their impact on various acoustic parameters such as reverberation time, speech intelligibility, definition, among others. The use of both materials brought the various parameters closer to acceptable values in a classroom, where speech understanding is paramount, improving the acoustic quality of the space.

**Keywords:** absorbent materials, recycled materials, acoustic characterization, acoustic quality, acoustic parameters

### Resumo

Existem no mercado diversos materiais reciclados com aplicações acústicas, que são utilizados para melhorar a qualidade sonora de diversos locais e evitar o uso de outros materiais comerciais que representam risco à saúde. No entanto, na América Latina, especificamente no México, muitas empresas ainda desconhecem as qualidades acústicas que podem ter os materiais reciclados obtidos através de diversos resíduos. Por meio de um tubo de impedância, foi quantificado o coeficiente de absorção de dois materiais reciclados à base de fibras têxteis e garrafas PET respectivamente, adquiridos por meio de duas empresas que destinam o uso desses materiais para questões alheias ao condicionamento acústico. Por meio de software especializado, foram realizadas simulações acústicas aplicando os referidos materiais reciclados para determinar seu impacto em vários parâmetros acústicos, como tempo de reverberação, inteligibilidade de fala, definição, entre outros. A utilização de ambos os materiais aproximou os vários parâmetros de valores aceitáveis numa sala de aula, onde a compreensão da fala é primordial, melhorando a qualidade acústica do espaço.

**Palavras-chave:** materiais absorventes, materiais reciclados, caracterização acústica, qualidade acústica, parâmetros acústicos

**PACS:** 43.55.Ev

## 1. INTRODUCCIÓN

Según datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, s.f.) en los 501 centros de acopio localizados en diferentes regiones del país, la mayoría ubicados en la Ciudad de México, se reciben todo tipo de materiales para su separación, clasificación y en algunos casos para su reciclaje o reúso. Datos del 2018 indican que entre los materiales que reciben se encuentran el papel, cartón, eléctricos, electrónicos, vidrio y PET (Polietileno Teraftalato) y de éstos sólo un porcentaje puede separarse. Cabe señalar que en la Ciudad de México es donde existe mayor recolección de residuos, seguido de su zona metropolitana y en orden descendente Jalisco, Veracruz, Nuevo León, Guanajuato y Puebla.

Desde la perspectiva de la economía circular, el reciclaje representa uno de los últimos procesos deseables para un material u objeto, ya que éste debería primero buscar la forma de dársele mantenimiento, en otro caso, buscar la forma de reutilizarse, o sino de restaurarlo o remanufacturarlo (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Sin embargo, se recurre al reciclaje de desechos, puesto que en México y en otros países se les puede encontrar desechados a cielo abierto en grandes concentraciones.

Debido a que este trabajo se centra en muestras de PET y fibras textiles, se ahondará en algunos datos relacionados a éstos. Por ejemplo, en un estudio de plásticos llevado a cabo por la Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (ANIPAC, 2023.), se señaló que existen 363 empresas a nivel nacional que reciclan algún tipo de plástico, siendo el polietileno (51.2 %) el que más se recicla, seguido del PET (22.1%), posteriormente el polipropileno (18.2 %), el PVC (Policloruro de Vinilo) con 2.1 %, el poliestireno (1.8 %) y otros plásticos representando el 4.6 %.

La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2016), señala que México es líder mundial en el reciclaje de PET, ya que se recuperan el 60.3 % de los envases, superando a Brasil, Estados Unidos y la Unión Europea con 42 %, 31 % y 25 % respectivamente; sin embargo, es importante recalcar que México es a su vez uno de los principales consumidores de este plástico (DGCS, 2021).

Con relación al reciclaje de textiles, el Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C. (CEMDA, 2019), advierten que el sector moda y textil requieren un enfoque de economía circular, ya que es uno de los

sectores que desaprovechan grandes cantidades de recursos económicos, materiales y naturales, además de impactar negativamente al medio ambiente debido a sus procesos altamente contaminantes, así mismo, advirtió que en México se reciclan solo el 5 % de los textiles desechados, debido a falta de innovación y costos en la producción, mientras que en Alemania se alcanza un 65 %.

En México existen muchos fabricantes que obtienen nuevos materiales a partir de desechos reciclables, que desconocen las ventajas que sus productos podrían aportar para alcanzar un confort acústico según el uso del espacio.

Para esta investigación, se han caracterizado a través de un tubo de impedancias, dos materiales de dos distintas empresas que destinan su materia prima para cuestiones ajenas a aplicaciones acústicas.

A través del *software* especializado CATT-Acoustic, se han considerado dichos coeficientes y se han realizado simulaciones de diversos parámetros acústicos, aplicados a espacios para el habla, específicamente aulas. Así mismo, se discutirán las mejoras que estos materiales pueden aportar para conseguir un adecuado confort acústico y calidad sonora y a su vez, promover con los fabricantes la caracterización acústica de sus productos.

## 2. CALIDAD Y CONFORT ACÚSTICO EN RECINTOS

Indudablemente, una adecuada calidad acústica está relacionada con confort acústico, término en el cual se involucran distintos aspectos a considerar, ya que no únicamente está relacionado con la calidad del sonido en el espacio, sino también con la percepción sonora que el receptor tenga dentro o fuera de un recinto y que sea aceptable en términos de presión sonora y calidad cuando se está realizando una actividad en específico y no suponga un impedimento para su realización. Así mismo, niveles sonoros elevados por lo general son poco confortables, así como sonidos con un contenido de frecuencias altas y medias, a diferencia de los compuestos por frecuencias medias y bajas. En este sentido, el confort acústico es un tanto subjetivo, ya que la percepción humana queda implícita (Barti, 2017).

Un adecuado diseño sonoro reducirá en gran medida una mala calidad acústica, la cual, al ser buena, puede potenciar el confort, la habitabilidad y la funcionalidad del recinto (Avilés y Perea, 2017,

p.495). Es por ello importante que los arquitectos o responsables de la concepción de los espacios arquitectónicos, cuenten con conocimientos relacionados con la acústica arquitectónica en todas sus áreas.

El no considerar un criterio acústico en la concepción de espacios arquitectónicos, es un común denominador aún en muchos países, ya que es un tema que en numerosas ocasiones se resuelve una vez que el espacio ya está construido o en una etapa posterior a la de diseño y comienzan a surgir los evidentes problemas acústicos del recinto en cuestión (Ipinza, 2015).

Si en los espacios no existen condiciones acústicas favorables, en especial en recintos donde predominan sonidos provenientes del habla, se pueden esperar diversos efectos adversos, por ejemplo, los niños son los más susceptibles en tener un bajo rendimiento académico, situación que está estrechamente relacionada con los elevados niveles de ruido y altos tiempos de reverberación que se tienen al interior del salón de clases, ya que su capacidad de escucha ante un ambiente acústicamente caótico es menos efectivo que la de un adulto, puesto que hasta la adolescencia es cuando esta capacidad comienza a ser buena, a pesar de las condiciones a las que se está expuesto (Klatte, Lachmann, y Mies, 2010).

Aunado a lo anterior, se enfatiza en que el confort integral en salones de clases y su relación con el rendimiento cognitivo del alumnado, está asociado a diversos factores, como pueden ser los ambientales, los relacionados a las condiciones físicas del aula, los recursos con los que se dispone y la relación entre el docente con los alumnos. Específicamente se hace hincapié en que los procesos cognitivos que más resultan afectados ante situaciones asociadas al ruido, son la atención y la memoria, concretamente la de corto plazo. El ruido afecta la capacidad para resolver problemas complejos y de manera rápida, además de llegar a generar estados de estrés e irritabilidad, afectando nuevamente la concentración (Zapata, C. M., et al., 2018, p.73-77 y 138-146).

A través de una revisión bibliográfica afín con la calidad acústica en aulas escolares, se indican las causas de esta carencia de confort acústico, la cual está relacionada en su mayoría con la ausencia de materiales absorbentes para reducir el tiempo de reverberación y por ende para obtener una mejor claridad en el mensaje oral recibido; seguido del ruido generado al exterior del recinto, por ejemplo de

locales contiguos o del ambiente exterior; posteriormente señalan las cuestiones relacionadas con las características de diseño arquitectónico propio de los espacios; también al ruido interno originado por los ocupantes y/u otros elementos internos del local, siendo los más comunes los proyectores y sistemas de ventilación; y finalmente, a la ubicación del recinto con relación a su contexto, lo cual hace referencia a que puede estar situado cerca de una zona industrial generadora de ruido o contigua a vialidades con gran aforo vehicular, por mencionar algunos (Durán, 2021).

### 3. AULAS Y PARÁMETROS DE CALIDAD ACÚSTICA APLICABLES

En estos espacios, se espera que los niveles de confort relacionados con aislamiento y acondicionamiento acústico estén controlados y ofrezcan una adecuada calidad sonora que favorezca el entendimiento del mensaje oral que reciben los presentes para una correcta comprensión del mismo.

En México, por ejemplo, el Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa, ha trabajado en normas que determinan requerimientos generales para el diseño de este tipo de espacios, donde señalan que las condiciones acústicas son de suma importancia en el proceso de enseñanza aprendizaje, donde el escuchar nítidamente marca la diferencia entre la comprensión o la incomprensión del mensaje recibido (INIFED, 2021).

Una adecuada calidad acústica y por ende confort sonoro en los espacios se puede evaluar a partir de ciertos parámetros, resaltando en primera instancia el tiempo de reverberación (TR), el cual puede definirse como la persistencia del sonido en el espacio una vez que la fuente sonora cesó; sin embargo, tiene una definición un tanto más técnica y que debe tomarse en cuenta al momento de realizar mediciones en el sitio. Dicha definición, establece que es el tiempo necesario en segundos para que un sonido impulsivo (estallido) o interrumpido (se detiene su propagación) descienda 60 dB (T60) respecto a su nivel máximo, restando los primeros 5 dB, por lo tanto, se toma el tiempo entre -5 dB a -65 dB. Esta situación, es difícil de alcanzar ante la presencia del ruido de fondo, consecuentemente, se utilizan variantes del tiempo de reverberación a 30 (T30), 20 (T20), 15 (T15) o 10 (T10) decibeles, las cuales corresponden a una

extrapolación a 60 dB, pero considerando menor tiempo de decaimiento (ArAc, s.f., p.32).

En espacios en los cuales el habla es importante, como un aula escolar, los tiempos de reverberación deben ser cortos, pudiendo ir desde los 0.6 segundos a 1 segundo en promedio (INIFED, 2021).

Otro parámetro relacionado con el tiempo de reverberación corresponde a la inteligibilidad de la palabra, la cual se ve reducida cuando los tiempos son largos. La inteligibilidad puede entenderse como “*una medida de la eficacia en la comprensión de la voz hablada, que, de una forma u otra, cuantifica el porcentaje del mensaje comprendido correctamente*” (Sommerhoff y Rosas, 2011, p.134). El parámetro que evalúa la inteligibilidad es el Índice de Transmisión de la Palabra Hablada (STI por sus siglas en inglés, *Speech Transmission Index*), el cual mide el grado de inteligibilidad entre valores de 0 a 1, donde 0 corresponde a una comprensión nula y 1 a un entendimiento absoluto (Arau, 1999, p.287), sin embargo, se pueden entender como valores buenos a excelentes entre 0.6 a 1 (Avilés y Perea, 2017, p.558). Por otra parte, se tiene el tiempo de decaimiento temprano, mejor conocido como EDT, por sus siglas en inglés (*Early Decay Time*), el cual mide el decaimiento de 0 dB a -10 dB, variando al igual que el tiempo de reverberación, en función de la frecuencia. Este parámetro define la impresión subjetiva de viveza, por lo que, si el EDT en algún punto es significativamente menor que el TR, el espacio se sentirá apagado, sin embargo, puede ayudar al entendimiento de la palabra o inteligibilidad de la misma (Avilés y Perea, 2017, p.566 y 567).

El tiempo central (Ts) es otro parámetro que puede tomarse en cuenta. Éste sugiere valores entre los 60 a 260 ms. Entre mayor sea el valor del tiempo central, la nitidez del sonido será menor, afectando en primera instancia la claridad del habla y posteriormente a la claridad musical (Rodríguez, Lancón, Garay, García y Ponce, 2015). Carrión (1998), señala que, si el TR de un recinto está entre 1 y 2 s, se esperarían valores de Ts entre 72 y 144 ms.

Así mismo, se tiene el parámetro de la definición (D), el cual al ser bajo se percibe poco íntimo y por ende un tiempo de reverberación alto. Se recomiendan valores por arriba de 0.5 (Avilés y Perea, 2017, p.568). La claridad (C) es otro parámetro a considerar y puede definirse como la relación de la energía que recibe el oyente en los primeros ms y la que llega posterior a ese tiempo. C, puede aplicarse para evaluar la voz (C<sub>50</sub>) y la música (C<sub>80</sub>), diferenciándose que en la

primera se toman los primeros 50 ms y en la segunda hasta los 80 ms. Específicamente para la voz, se recomiendan valores por arriba de 2dB, puesto que entre más elevado sea dicho valor, la inteligibilidad de la palabra será mejor, sin embargo, es importante no llegar a condiciones acústicas en exceso absorbentes que hagan percibir el espacio demasiado seco (Avilés y Perea, 2017, p.569).

Otro parámetro es el ruido de fondo, el cual puede provenir o ser de tipo aéreo, estructural o de algún equipo eléctrico y que se define como “*Ruido procedente de toda fuente que no sea la fuente de interés (UNE-EN ISO 3744:1996)*” (SEA, 2012) y debe cuantificarse el evaluar acústicamente un aula, puesto que se requieren valores entre 30 a 35 dBA, mientras que en espacios donde por si solos se genera ruido debido a las actividades realizadas en los mismos, tales como cocinas, estacionamientos o gimnasios, los niveles de ruido pueden superar los 50 dBA (Arau, 1999, p.69 y 70).

#### 4. MATERIALES RECICLADOS ABSORBENTES

Existen en el mercado productos con características significativas para absorber la energía sonora, entre los más comunes se encuentran fibras de vidrio, lanas de roca minerales y espumas de poliuretano, por el contrario, se han comenzado a emplear diversidad de materiales que durante su proceso de producción generen una huella de carbono reducida, ya que cuando se producen materiales sintéticos, se contribuye a la emisión de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, lo que ha favorecido a la exploración de materiales denominados ecológicos, renovables, reciclados, sustentables, entre otros, que durante su obtención, producción o fabricación contemplen procesos menos contaminantes y evidentemente ofrezcan propiedades adecuadas para el uso contemplado (Arenas, Alba, Del Rey, Ramis y Suárez, 2013, p.42).

Lo que convierte a un material en reciclado es su transformación a “*...través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos;*” (Cámara de Diputados, 2021).

Cuando se obtiene un material reciclado, es conveniente evaluar sus posibles propiedades con

características por ejemplo térmicas, acústicas, de dureza, de maleabilidad, entre otras, para su aplicación en diversos campos. Con relación al campo de la acústica, desde hace varios años, se han realizado diversas investigaciones y se continúan analizando diferentes materiales reciclados con aplicaciones principalmente para el acondicionamiento acústico.

Estudios que han evaluado muestras o inclusive paneles basados en fibras naturales de origen vegetal como el bambú, la fibra de coco, el arroz, por mencionar algunos, han demostrado diversos comportamientos de los coeficientes acústicos analizados, por ejemplo, cuando las muestras contienen cierta humedad, los coeficientes se ven modificados, los de reflexión tienden a ser más altos en comparación a los de muestras secas, mientras que los de transmisión son bajos contra muestras secas y los de absorción son bajos cuando hay humedad de por medio (Victoria et al., 2018).

Otras investigaciones han mostrado que este tipo de materiales, son efectivos absorbentes del sonido - inclusive superior a materiales comerciales- en bajas frecuencias con un coeficiente de absorción por arriba de 0.5, mientras que en medias y altas frecuencias por arriba de 0.8 (Raj, Fatima y Tandon, 2020).

Así mismo, se ha explorado que al cambiar o variar en algunos casos el aglutinante que mantiene unidas las fibras, puede haber una buena absorción en bajas frecuencias (Lekshmi, Vishnudas y Anil, 2023).

Estudios comparativos de materiales provenientes de residuos de fibras textiles como la mezclilla y el yute con relación a materiales habitualmente aplicados como la fibra de vidrio u otros, han demostrado ser igual o inclusive más efectivos que éstos (Raj, Fatima y Tandon, 2020).

Dos estudios de relevante referencia, debido a la metodología empleada, corresponde en primera instancia a lo realizado por Yun, et al. (2020), quienes a través de un tubo de impedancias evaluaron las propiedades acústicas de compósitos de desechos orgánicos de café. Posteriormente, realizaron simulaciones por computadora en el programa especializado ODEON del recinto de estudio (cafetería) y determinaron el mejoramiento de diversos parámetros de calidad acústica, como el tiempo de reverberación, el cual disminuyó al proponer la colocación de paneles en el local. El otro estudio pertenece a Buratti, Belloni, Lascaro, Lopez y Ricciardi (2016), quienes igualmente a través de un

tubo de impedancias, evaluaron acústicamente compósitos hechos a base de desechos de papel, textiles y pegamento, con diversidad de espesores. Así mismo, analizaron ambientalmente las muestras al realizarles un estudio de ciclo de vida. En este caso, modelaron un aula de clases en el programa RAMSETE para evaluar la mejora en la calidad acústica del espacio.

## 5. CARACTERIZACIÓN ACÚSTICA DE MATERIALES RECICLADOS

Los materiales elegidos para esta investigación, consistieron en muestras de textiles y de PET reciclados de dos distintas empresas mexicanas que los recolectan, quienes después de diversos procesos de transformación y producción distribuyen dichos materiales para su uso y aplicación en distintos ámbitos, como: la industria textil y de calzado, colchonero, empaques térmicos, producción de pañales, toallas húmedas y sanitarias, entre otros, ajenos a aplicaciones acústicas.

La caracterización de los materiales se realizó a partir del empleo de un tubo de impedancia o de incidencia normal. El tubo de impedancia que se empleó se rige bajo la Norma ASTM E1050 – 98 “*Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Materials Using a Tube, Two Microphones and A Digital Frequency Analysis System*”. El tubo consta de una sola cámara acústica con una fuente sonora en un extremo, mientras que por el otro se localiza el respaldo que contempla el porta muestras para colocar el material de prueba a caracterizar. El registro de señales se realiza mediante micrófonos colocados entre la muestra y la fuente sonora (Figura 1) y un sistema digital de análisis de frecuencias.

El método se basa en la generación de una onda plana al interior del tubo proveniente de la fuente sonora, que posteriormente se convertirá en una onda estacionaria por su descomposición en onda incidente y onda reflejada, generando diferencia de presiones, las cuales son detectadas y captadas por ambos micrófonos para continuar con el procesamiento de datos complejos basados en una función de transferencia.

El rango de operación del tubo de impedancia abarca de los 50 Hz a los 5000 Hz y el diámetro de las muestras debe ser de 3.81 cm y con un espesor variable de máximo de 8 cm.

La muestra de textil reciclado (Figura 2) contaba con un espesor de 3.7 cm y arrojó un NRC de 0.50; mientras que la muestra de PET reciclado (Figura 3) tenía un espesor de 4.3 cm y un NRC de 0.53. Puede

observarse que la muestra de textil tiene una mejor respuesta de absorción acústica por arriba de los 1000 Hz y la de PET por encima de los 2000 Hz.

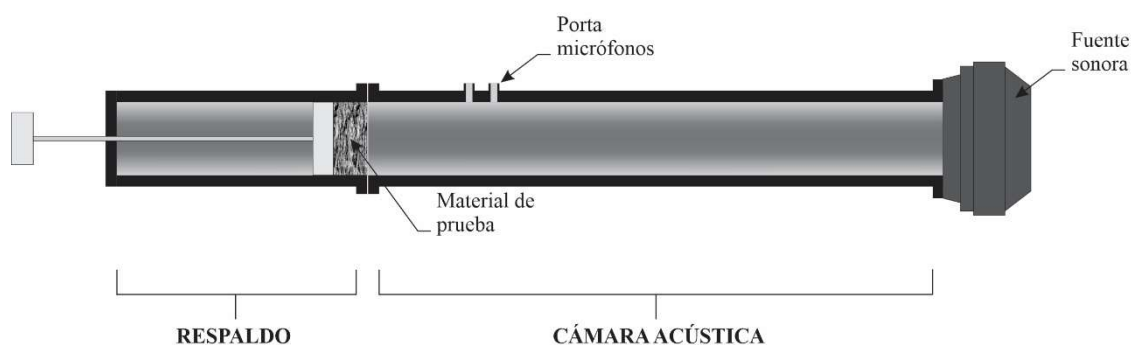


Figura 1. Elementos del tubo de impedancia de una sola cámara acústica. Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Ficha acústica de la muestra de textil reciclado. Fuente: Elaboración propia.

## 6. SIMULACIÓN ACÚSTICA PARA LA OBTENCIÓN DE DIVERSOS PARÁMETROS ACÚSTICOS

Para contar con un modelo de simulación acústica por computadora, primero fue necesario realizar un levantamiento arquitectónico del recinto y posteriormente la ejecución de mediciones *in situ* del recinto, de acuerdo al procedimiento que establece la norma UNE-EN ISO 3382-2 (Acústica. Medición de parámetros acústicos en recintos. Parte 2: Tiempo de

reverberación en recintos ordinarios) y realizar un levantamiento arquitectónico del espacio.

El espacio a evaluar, correspondió a un aula escolar a nivel licenciatura de la Universidad Autónoma Metropolitana de la Unidad Azcapotzalco (UAM-A) de la Ciudad de México. En dicha aula se imparten clases a alumnos de las Licenciaturas en Arquitectura, Diseño de la Comunicación Gráfica y Diseño Industrial y el cupo es variable, con una capacidad máxima de hasta 35 alumnos, aunque para el estudio, se consideró un 75 % de la ocupación total.





Figura 3. Ficha acústica de la muestra de PET reciclado. Fuente: Elaboración propia.

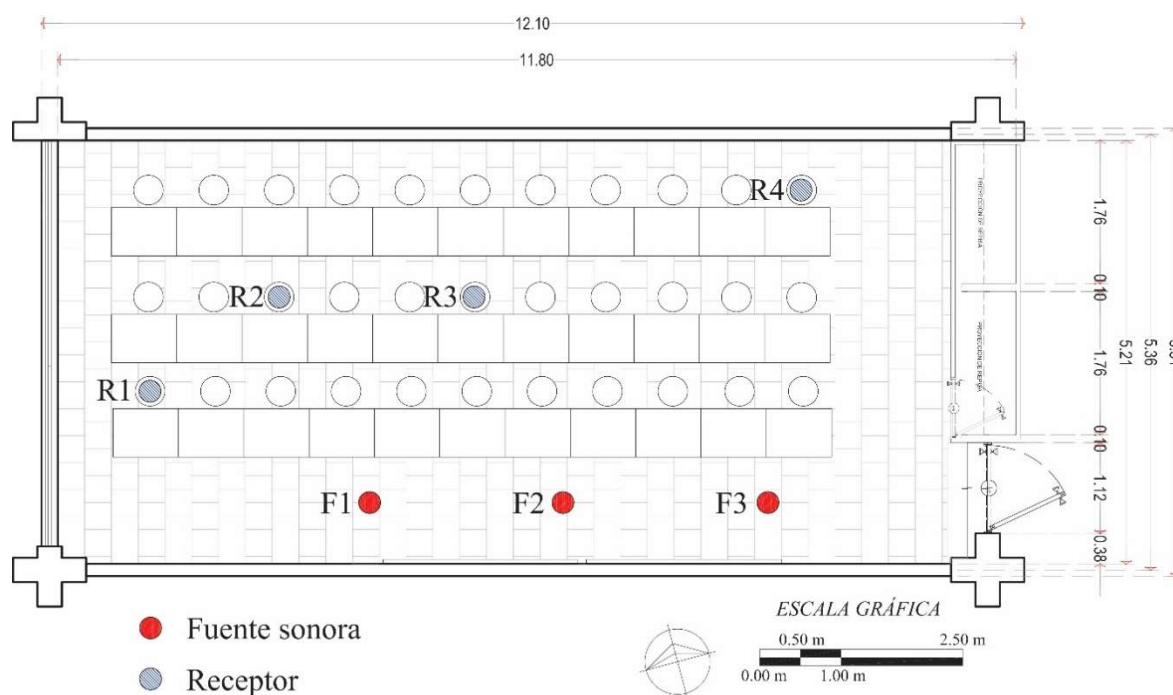
Se establecieron tres lugares para ubicar una fuente sonora a la vez, de esta forma se abarca la zona donde por lo general el docente se desplaza para impartir las clases. Los receptores o bien la audiencia, se distribuyó en el área de los restiradores (Figura 4). Para la generación, recepción y procesamiento de la señal se utilizó un analizador Norsonic (Nor140) con un micrófono de 1/2" omnidireccional y una fuente semidodecaédrica (Nor275), la cual se utilizó para generar un ruido interrumpido. Tanto la fuente sonora como el micrófono se ubicaron a una altura de 1.20 metros del nivel del piso. Se obtuvieron tiempos de reverberación superiores a 1 segundo en todas las bandas de octava a analizar (Tabla 1), tiempos que deberían ser inferiores según lo establecido por el INIFED.

Mediante el *software* CATT-Acoustic, se generó un modelo en tercera dimensión del aula en su estado actual, es decir se consideraron los muebles con los que está equipado el espacio. Así mismo, se asignaron los coeficientes de absorción y difusión sonora de cada uno de los paramentos y mobiliario del aula. Consecuentemente, con las mediciones experimentales se hizo un ajuste con el modelo de simulación acústica con relación al tiempo de reverberación. Las diferencias justamente perceptibles (JND por sus siglas en inglés *Just Noticeable Difference*) entre las mediciones experimentales y el modelo de simulación, no superaron 1 JND, el cual equivale al 5% de este parámetro (Martellota, 2010) (Tabla 1), asumiendo y determinando que el modelo es fiable para reproducir las cualidades acústicas del aula.

**Tabla 1.** Valores del tiempo de reverberación medido *in situ* y simulado con sus JND correspondientes.

Fuente: Elaboración propia.

| TIEMPOS DE REVERBERACIÓN DEL AULA EN SU ESTADO ACTUAL |        |        |        |         |         |         | TR     |
|---|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|
| FRECUENCIA  | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |        |
| Medición <i>in situ</i>                               | 1.80 s | 1.80 s | 2.13 s | 2.07 s  | 1.91 s  | 1.34 s  | 1.84 s |
| Simulado  | 1.74 s | 1.76 s | 2.05 s | 2.04 s  | 1.88 s  | 1.38 s  | 1.80 s |
| JND   | 3.20%  | 2.36%  | 3.87%  | 1.33%   | 1.44%   | 2.99%   |        |



### AULA 117 / EDIFICIO L

Figura 4. Planta arquitectónica del aula con la ubicación de las fuentes sonoras y los receptores. Fuente: Elaboración propia.

Una vez ajustado el modelo, se procedieron a realizar simulaciones para la obtención de diversos parámetros de calidad acústica, considerando diversos escenarios, el primero en su estado actual (Figura 5a), el segundo asumiendo una ocupación del 75% en su estado actual (Figura 5b) y el tercero y cuarto añadiendo 6 (Figura

5c) y 8 (Figura 5d) paneles absorbentes a la altura del techo respectivamente, de textiles y PET reciclados, de los cuales se aplicaron los coeficientes de absorción obtenidos experimentalmente en el tubo de impedancia.

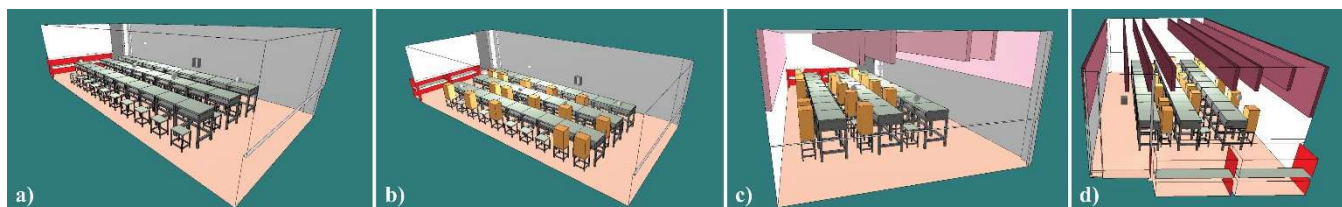


Figura 5. Modelos en tercera dimensión generados en *software* CATT-Acoustic: a) estado actual, b) estado actual con 75% de audiencia, c) 6 paneles y d) 8 paneles. Fuente: Elaboración propia.

## 7. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con relación al tiempo de reverberación (Fig. 6), se observa que los niveles en su estado actual y aún con audiencia, no están dentro de los intervalos recomendados, apreciándose tiempos altos que seguramente interferirán con la nitidez del mensaje oral.

Los tiempos de reverberación más bajos se obtuvieron con la aplicación de 8 paneles de PET reciclado, seguido de la aplicación de 8 paneles de textil reciclado y posteriormente con la aplicación de 6 paneles

respectivamente. Puede observarse que los paneles generan un comportamiento parecido entre las frecuencias de 125 Hz a 500 Hz, mientras que por encima de los 500 Hz es más aleatorio.

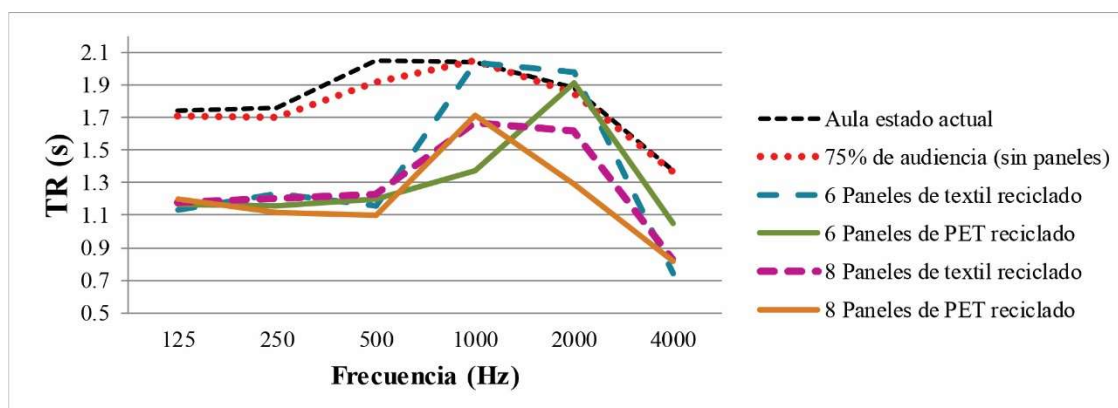
Para el RASTI y el STI (Tabla 2), se obtuvieron resultados de mala a aceptable para el espacio en su estado actual y contemplando el uso de aula con capacidad del 75% de audiencia, mientras que al proponer la colocación de algunos paneles (6 y 8), los valores cambiaron de buena a muy buena.

Los valores de EDT para el aula en su estado actual y con audiencia, no tuvieron diferencias significativas con relación a los valores del TR, sin embargo, al



aplicar paneles absorbentes los valores son perceptiblemente menores al TR, lo que indica claridad

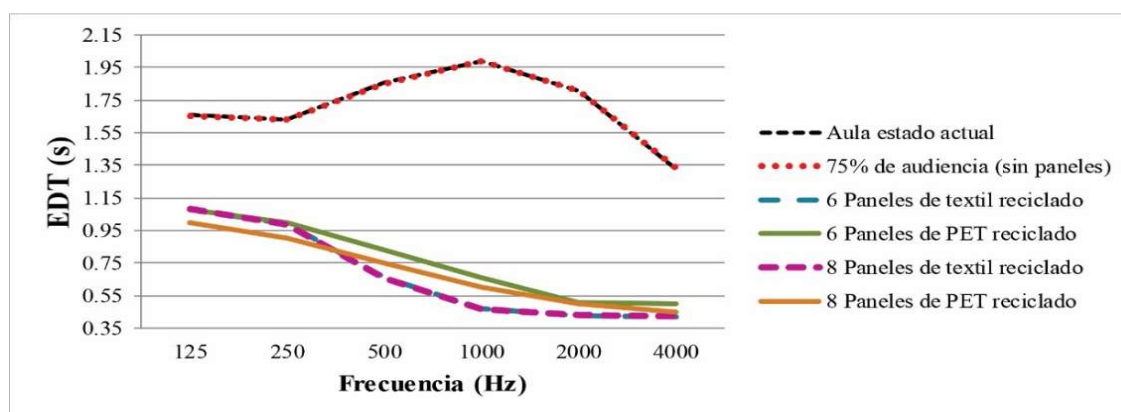
en el habla, influyendo positivamente en la inteligibilidad de la palabra (Figura 7).



**Figura 6.** Tiempos de reverberación del aula de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 2.** Valores del RASTI y STI de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.

| SIMULACIÓN                     | RASTI                    | STI                      |
|--------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Aula estado actual             | 0.46 (mala)              | 0.50 (mala - aceptable)  |
| 75% de audiencia (sin paneles) | 0.46 (mala)              | 0.50 (mala - aceptable)  |
| 6 Paneles de textil reciclado  | 0.72 (muy buena)         | 0.71 (muy buena)         |
| 6 Paneles de PET reciclado     | 0.68 (buena)             | 0.68 (buena)             |
| 8 Paneles de textil reciclado  | 0.72 (muy buena)         | 0.71 (muy buena)         |
| 8 Paneles de PET reciclado     | 0.70 (buena - muy buena) | 0.70 (buena - muy buena) |



**Figura 7.** Valores de EDT de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 8 puede observarse que, con la aplicación de paneles, el  $T_s$  tiene un comportamiento decreciente a medida que la frecuencia se hace más alta. Por el contrario, hay mayor variabilidad de valores con el aula en su estado actual y con audiencia. Al realizar una comparación entre todas las situaciones, los tiempos centrales al proponer paneles absorbentes, ayudan a la

claridad del habla, situación que no es benéfica para el aula en su estado actual, aún al contemplar audiencia en el aula.

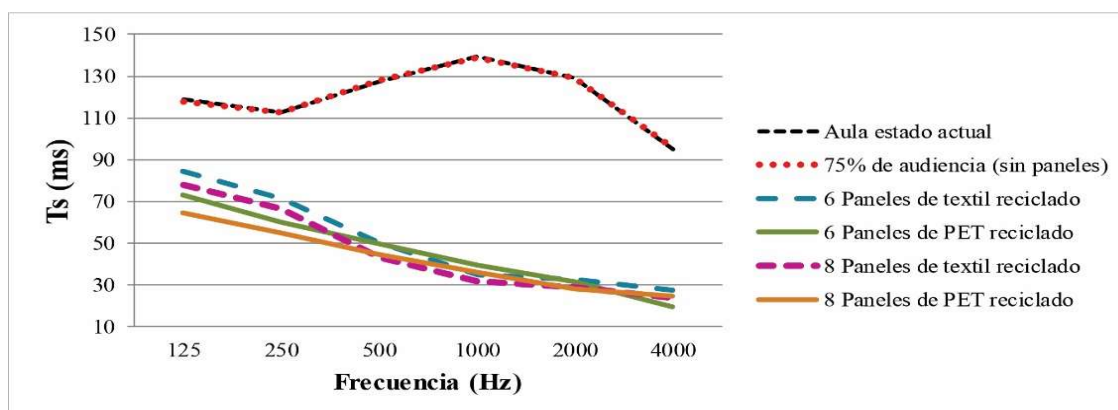
Relativo a  $D_{50}$  (Figura 9), como era de esperarse, los valores de este parámetro en el aula en su estado actual y con audiencia, hacen sentir el espacio poco íntimo, lo cual está relacionado con los altos tiempo de

reverberación. En cambio, la mayor parte de los valores, a excepción de los correspondientes en la frecuencia de 125 Hz, están dentro de los valores recomendados.

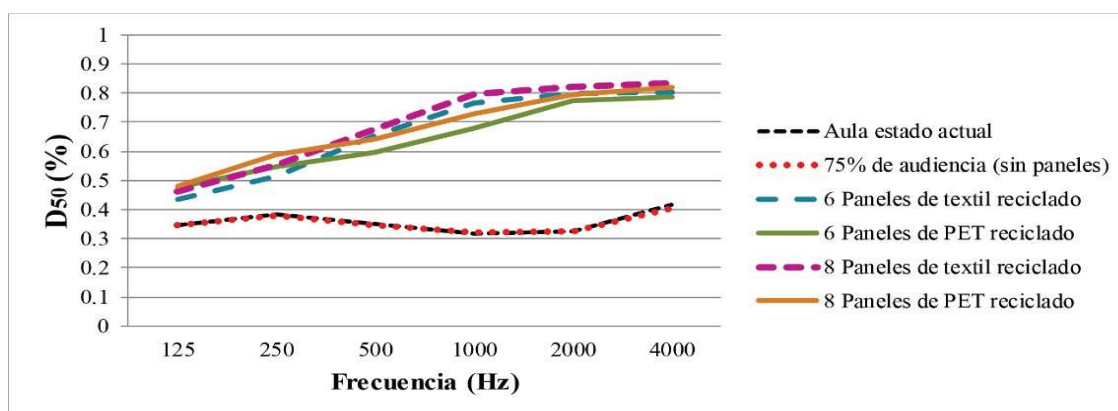
Debido a que  $C_{50}$  no lo calcula como tal el *software*, éste hace referencia a una tabla para convertir los datos de  $D_{50}$  a  $C_{50}$ . En la tabla 3, se visualizan los datos de  $C_{50}$  en cada uno de los escenarios simulados. Según los valores recomendados, se sugieren arriba de 2dB,

situación que se cumple en la mayor parte de los valores por encima de los 1000 Hz al aplicar paneles acústicos absorbentes. Evidentemente, todos los valores del estado actual y con audiencia, no se encuentran dentro de lo sugerido.

En cuanto a niveles de ruido de fondo, se empleó el analizador Norsonic (Nor140) y se obtuvieron valores alrededor de los 35 a 40 dBA, por lo que se considera adecuado el espacio en este sentido.



**Figura 8.** Valores de  $T_s$  de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 9.** Valores de  $D_{50}$  de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 3.** Valores de  $C_{50}$  de los diferentes escenarios simulados. Fuente: Elaboración propia.

|                                | $C_{50}$ |         |         |         |         |         |
|--------------------------------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| FRECUENCIA                     | 125 Hz   | 250 Hz  | 500 Hz  | 1000 Hz | 2000 Hz | 4000 Hz |
| Aula estado actual             | -3.7 dB  | -3.7 dB | -3.7 dB | -3.7 dB | -3.7 dB | -1.8 dB |
| 75% de audiencia (sin paneles) | -3.7 dB  | -3.7 dB | -3.7 dB | -3.7 dB | -3.7 dB | -1.8 dB |
| 6 Paneles de textil reciclado  | -1.8 dB  | 0 dB    | 1.8 dB  | 3.7 dB  | 6 dB    | 6 dB    |
| 6 Paneles de PET reciclado     | -1.8 dB  | 0 dB    | 1.8 dB  | 1.8 dB  | 3.7 dB  | 3.7 dB  |
| 8 Paneles de textil reciclado  | -1.8 dB  | 0 dB    | 1.8 dB  | 6 dB    | 6 dB    | 6 dB    |
| 8 Paneles de PET reciclado     | -1.8 dB  | 0 dB    | 1.8 dB  | 3.7 dB  | 3.7 dB  | 6 dB    |

## 8. CONCLUSIONES

La metodología implementada muestra que el uso de materiales reciclados contribuye a mejorar la calidad acústica de un recinto, verificando a través de la cuantificación de diversos parámetros acústicos.

A partir del empleo del *software* CATT-Acoustic, se pudo obtener la respuesta acústica de un recinto utilizado un aula escolar a nivel licenciatura, previamente partiendo de un levantamiento del espacio y realizando los ajustes necesarios con las mediciones experimentales *in situ* para garantizar la fiabilidad de las respuestas del sistema.

La aportación principal de este trabajo, se basa en la caracterización acústica de materiales que no son usados para este fin y que contemplan datos importantes que los fabricantes desconocen y por ende pueden representar un nuevo campo de aplicación.

La caracterización acústica de los materiales reciclados obtenidos mediante el tubo de impedancia muestra una alta eficacia en el coeficiente de absorción para frecuencias por arriba de los 1000 Hz. Con ello los materiales reciclados utilizados en este trabajo, como textiles y PET reciclados, muestran su aplicación para reducir el tiempo de reverberación, con lo cual se incrementa la calidad acústica del recinto a partir de su estado actual y ajustarlo a los valores recomendados por el INIFED. De esta manera es posible implementar el análisis de diferentes espacios para determinar la ubicación y el área de superficie que debe ser cubierta para mejorar la calidad acústica de un recinto con materiales reciclados absorbentes.

Este escrito corresponde a una conferencia llevada a cabo en enero de 2023, en la Semana del Sonido, organizada por el Instituto de Acústica y Vibroacústica del Perú (INPAVAC) y auspiciada por la organización de *International Year of Sound 2020+*. Se han afinado aspectos puntuales para la publicación del texto.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ya que este trabajo ha sido apoyado por dicho organismo para los estudios de maestría en el programa Diseño Bioclimático en la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco.

Finalmente, se agrade a las y los editores y revisores de la revista ECOS para la publicación de este escrito.

## REFERENCIAS

- ArAc. (s.f.) *Multibook of Architectural Acoustics*. Recuperado el 31 de enero de 2023 de <https://arac-multibook.com/>
- Arau, H. (1999). *ABC de la Acústica Arquitectónica*. Barcelona, España: Ediciones ceac.
- Arenas, J. P., Alba, J., Del Rey, R., Ramis, J., y Suárez, E. (2013). *Materiales Absorbentes Ecológicos para Pantallas Acústicas*. España: Publicaciones Universidad de Alicante.
- Asociación Nacional de Industrias del Plástico A.C. (2023). *Estudio cuantitativo de la industria del reciclaje de plásticos en México*. Recuperado el 18 de abril de 2023 de <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2023/02/Estudio-Cuantitativo-de-la-Industria-del-Reciclaje-en-Mexico-VF.pdf>
- Avilés, R., y Perera, R. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica*. Madrid, España: Editorial Paraninfo.
- Barti, R. (2017). Valoración del confort acústico. *Tecniacústica 2017, 48º Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Symposium on Underwater Acoustics Applications, European Symposium on Sustainable Building Acoustics*, 296-309.
- Buratti, C., Belloni, E., Lascaro, E., Lopez, G.A., y Ricciardi, P. (2016). Sustainable panels with recycled materials for building applications: environmental and acoustic characterization. *Energy Procedia*, 101, 972-979. doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.123
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2021). *Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos*. Recuperado el 17 de febrero de 2023 de [https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263\\_180121.pdf](https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_180121.pdf)
- Carrión, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. España, Barcelona: UPC (Universidad Politécnica de Catalunya).
- Centro Mexicano de Derecho Ambiental A.C. (2019). *Promoción de la economía circular en el sector moda y textil en México*. Recuperado el 18 de abril de 2023 de <https://www.cemda.org.mx/wp->

- content/uploads/2019/08/CEM\_moda\_publicaci%C3%B3n.pdf
- Dirección General de Comunicación Social. 2021. *Boletín UNAM-DGCS-607*. Recuperado el 18 de abril del 2023 de [https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021\\_607.html](https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2021_607.html)
- Duran, A. E., Jimeno, M. G., Rodríguez, D. S., Meléndez, A. I., Palacios, W., y Mendoza, D. A. (2021). Condiciones acústicas en las aulas de clase: Una revisión de la literatura. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 9(2), 79-90. doi.org/10.17081/invinno.9.2.4908
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition*. Recuperado el 27 de febrero de 2023 de <https://ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (s.f.). *Cuéntame de México*. México. Recuperado el 18 de abril de 2023 de <https://cuentame.inegi.org.mx/territorio/ambiente/basura.aspx?tema=T>
- Instituto Nacional de la Infraestructura Física Educativa. (2021). *Normas y especificaciones para estudios, proyectos, construcción e instalaciones. Volumen 3: Habitabilidad y funcionamiento, Tomo IV: Acondicionamiento Acústico*. México. Recuperado el 21 de febrero de 2023 de [http://www.inifed.gob.mx/doc/pdf/2021/Normatividad/VOLUMEN\\_3\\_TOMO\\_IV\\_ACUSTICA\\_2021.pdf](http://www.inifed.gob.mx/doc/pdf/2021/Normatividad/VOLUMEN_3_TOMO_IV_ACUSTICA_2021.pdf).
- Ipinza, C. (2015). Arquitectura y Acústica en Centros Educativos. Una mirada al panorama chileno. *Revista A+C*, (6). 75-85.
- Klatte, M., Lachmann, T., y Mies M. (2010). Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. *Noise & Health*, 12(49). 270-282. doi: 10.4103/1463-1741.70506
- Lekshmi, M.S., Vishnudas, S., y Anil, K.R. (2023). Experimental investigation on acoustic performance of coir fiber and rice husk acoustic panels. *Applied Acoustics*, 204(109244). doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109244
- Martellota, F. (2010). The just noticeable difference of center time and clarity index in large reverberant spaces. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 128(2), 654-663. doi.org/10.1121/1.3455837
- Raj, M., Fatima S., y Tandon, N. (2020). Recycled materials as a potential replacement to synthetic sound absorbers: A study on denim shoddy and waste jute fibers. *Applied Acoustics*, 159(107070). doi.org/10.1016/j.apacoust.2019.107070
- Rodríguez, F. E., Lancón, L. A., Garay, E., García, S. G., y Ponce D. R. (2015). Análisis de la respuesta acústica de la capilla del San Francisco de Asís en Azcapotzalco, México: Estudio del impacto que causaron las intervenciones arquitectónicas. *Tecniacústica 2015, 46° Congreso Español de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica, European Symposium on Virtual Acoustics and Ambisonics*, 1382-1388.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). Residuos sólidos urbanos: la otra cara de la basura. Recuperado el 18 de abril de 2023 de <https://www.gob.mx/semarnat/galerias/residuos-solidos-urbanos-la-otra-cara-de-la-basura-18815>
- Sociedad Española de Acústica. (2012). *Glosario de Términos Acústicos*. España: Editorial Sociedad Española de Acústica.
- Sommerhoff, J., y Rosas, C. (2011). Estudio de la correlación entre STI y test de inteligibilidad subjetivo. *Estudios Filológicos*, (47), 133-147. doi.org/10.4067/S0071-17132011000100008
- Victoria, U., Vázquez, R. E., Cantarey, D., Lancón, L. A., Villeda, R., García, S. G., y Arroyo, V. (2020). Caracterización acústica de bambú mediante análisis estacionario. *Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida*, 35(85), 15-20.
- Yun, B. Y., Cho H. M, Kim, Y. U., Lee, S.C., Berardi, U. Kim, S. (2020). Circular reutilization of coffee waste for sound absorbing panels: A perspective on material recycling. *Environmental Research*, 184(109281). doi.org/10.1016/j.envres.2020.109281
- Zapata, C. M., Viegas, G. M., San Juan, G. A., Ramos, H., Coronado, J. A., Ochoa, J.,... Montoya, O. L. (2018). *Comodidad ambiental en las aulas escolares. Incidencia en la salud docente y en el rendimiento cognitivo de los estudiantes en colegios públicos de Bogotá, Medellín y Cali*, Medellín, Colombia: Editorial Bonaventuriana.