



**Diseño de Infraestructura verde para el acondicionamiento y confort acústico:
una estrategia sostenible en espacios educativos**

Isabela Correa Bolívar

Trabajo de grado presentado para optar al título de Arquitecto

Docente

Luis Felipe Lalinde Castrillón, Doctor (PhD) en Ingeniería de la construcción

Manuela Murillo Galvis, Magíster (MSc) en Bioclimática

Universidad Pontificia Bolivariana

Escuela de Arquitectura y Diseño

Arquitectura

Medellín, Antioquia, Colombia

2026

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado, en primer lugar, a mi familia, quienes han sido el pilar fundamental a lo largo de todo este proceso. Su apoyo constante, su confianza y su acompañamiento han hecho posible que este camino académico se construya con fortaleza y perseverancia. Cada logro alcanzado es también reflejo de su esfuerzo, de su paciencia y del amor con el que han estado presentes en cada etapa.

A mis amigos, quienes han compartido conmigo no solo los momentos de exigencia y trabajo, sino también los espacios de aprendizaje, crecimiento y apoyo mutuo. Su compañía ha sido esencial para mantener el equilibrio, la motivación y la energía necesaria para avanzar en este proceso.

A mi pareja, por su apoyo incondicional, por su comprensión en los momentos de mayor exigencia y por ser una presencia constante que aporta tranquilidad, confianza y ánimo. Su acompañamiento ha sido fundamental para afrontar los retos de este proceso con mayor seguridad.

Esta investigación no es solo un resultado académico, sino también el reflejo de todas las personas que han estado presentes en este camino, aportando desde su lugar para que este logro sea posible.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a los docentes que acompañaron el desarrollo de esta investigación, quienes con su conocimiento, guía y compromiso hicieron posible la construcción de este trabajo.

Al docente Luis Felipe Lalinde Castrillón, Doctor en Ingeniería de la Construcción, por sus aportes técnicos, su rigurosidad académica y su orientación en el desarrollo del enfoque metodológico. Su acompañamiento permitió fortalecer la comprensión del acondicionamiento acústico y del comportamiento del tiempo de reverberación desde una perspectiva técnica y fundamentada.

De manera muy especial, agradezco a la docente Manuela Murillo Galvis, Magíster en Bioclimática, por su constante apoyo, dedicación y guía a lo largo de todo el proceso. Su acompañamiento fue fundamental para orientar el desarrollo del proyecto, no solo desde lo académico, sino también desde lo conceptual y proyectual. Su disposición, claridad y compromiso fueron clave para consolidar esta investigación de manera coherente y rigurosa. Asimismo, destaco su calidad humana, siendo no solo una excelente profesional, sino también una gran persona, cuya cercanía y vocación hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) por brindar el espacio académico, los recursos y el entorno de formación que hicieron posible el desarrollo de este trabajo. La formación recibida en esta institución ha sido fundamental para el desarrollo de las capacidades críticas, técnicas y proyectuales que sustentan esta investigación.

A todos ellos, mi más sincero agradecimiento por su tiempo, sus enseñanzas y por contribuir de manera significativa en este proceso académico.

Tabla de contenido

Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
1 Planteamiento del problema	17
Pregunta de investigación:	18
Antecedentes	18
2 justificación	19
3 Objetivos	20
4 Hipótesis	21
5 Marco Teórico-Conceptual	22
• Marco Contextual	29
6 Metodología	36
Cronograma:	40
Referencias	87

Lista de tablas

Tabla 1- <i>Matriz acerca de diferentes autores que proponen el diseño biofílico – Autoría Propia</i>	18
Tabla 2- Tablas decibeles- Normativas de niveles de ruido ambiental en Medellín-Antioquia	31
Tabla 3- Cronograma – Plan de trabajo.....	40
Tabla 4- Calculo de áreas-Autoría propia	49
Tabla 5- Calculo huellas-Autoría propia	51
Tabla 6- Tabla área funcional-Autoría propia	51
Tabla 7- Muro 2-Autoría propia	54
Tabla 8- Muro 3-Autoría propia	54
Tabla 9- Paneles ladrillos-Autoría propia	55
Tabla 10- Tabla 1: Fuentes y referentes utilizados para la obtención de la información- Autoría propia.....	56
Tabla 11- Tabla 2: Vegetación general- Autoría propia	56
Tabla 12- Tabla 3: Vegetación depurada para el contexto de Medellín- Autoría propia.....	57
Tabla 13- Sistemas vegetales-Autoría propia.....	58
Tabla 14- Comparativa sistemas vegetales- Autoría propia.....	59
Tabla 15- Cálculos sistemas vegetales- Autoría propia	60
Tabla 16- Volumen- Autoría propia	60
Tabla 17- Diagnóstico inicial- Autoría propia	61
Tabla 18- 1er escenario panel rígido-Autoría propia	62
Tabla 19- 2do escenario panel rígido-Autoría propia	62
Tabla 20- 3er escenario panel rígido-Autoría propia	63
Tabla 21- 4to escenario panel rígido-Autoría propia	63
Tabla 22- 1er escenario bolsillos-Autoría propia	64
Tabla 23- 2do escenario panel rígido-Autoría propia	64

Tabla 24-3er escenario panel rígido-Autoría propia65

Tabla 25-4to escenario panel rígido-Autoría propia65

Tabla 26- Evaluación comparativa-Autoría propia70

Tabla 27-Costo total-Autoría propia74

Tabla 28-Costos-Autoría propia74

Tabla 29-Comparación costos-Autoría propia74

Tabla 30-*Cumplimiento de objetivos de la investigación-Autoría propia*84

Lista de figuras

Figura 1 -Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). Informe Medellín: Mapa de ruido ambiental.	17
Figura 3 -Mapa mental acerca de los conceptos principales– Autoría Propia	22
Figura 4 -Esquema de los procesos de reflexión, absorción y transmisión del sonido. Adaptado de “¿Hay contaminación acústica?”, Estamos en la Onda (s. f.),	23
Figura 5 -Montaje experimental de fachada verde para estudio de aislamiento acústico. Adaptado de “Green vertical systems for buildings as passive acoustic insulation,” por G. Pérez	24
Figura 6 -Hedera helix (hiedra común)	25
Figura 7 -Ficus pumila	25
Figura 8 -Esquema experimental del comportamiento acústico de fachadas verdes. Azkorra et al. (2015)	27
Figura 9 -Esquema experimental del comportamiento acústico de fachadas verdes. Azkorra et al. (2015)	28
Figura 10 -Comparación de las características de diferentes sistemas de muros verdes. Adaptado de “Green vertical systems for buildings as passive acoustic insulation,” por G. Pérez, L. Rincón.	29
Figura 11 -Tipos de ruido que inciden al interior del aula de clase.(Building Bulletin 93,2003)..	29
Figura 12 -Mapas-Normativas de niveles de ruido ambiental en Medellín-Antioquia.....	31
Figura 13 -Mapa de ruido de día-Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	32
Figura 14 -Mapa de ruido de día-Área Metropolitana del Valle de Aburrá.....	32
Figura 15 -Zonas de la ciudad con más ruido -secretaría de seguridad de Medellín-El colombiano(2024)	33
Figura 16 -Zonas contaminación auditiva -Área Metropolitana del Valle de Aburrá-Elcolombiano(2024).....	35
Figura 17 -Matriz acerca clasificación de los métodos empleados en la investigación según su enfoque cualitativo o cuantitativo, – Autoría Propia.....	36
Figura 18 -Matriz acerca de las fases de la metodología	37
Figura 19 -Mapa mental de los métodos de experimentación de la investigación.....	38

Figura 20- <i>Cronograma de trabajo-Autoría propia</i>	40
Figura 21- <i>Los resultados se representan mediante gráficos circulares, que muestra la distribución porcentual de las respuestas obtenidas-Autoría propia</i>	42
Figura 22- Imagen sonómetro-Autoría propia tomada en campo	44
Figura 23- Localización bloque-Google	44
Figura 24- Plantas con análisis acústico-Autoría propia.....	44
Figura 25- Isométrico Nivel 3 bloque arquitectura-Autoría propia	46
Figura 26- Planta-Autoría propia	47
Figura 27- <i>Sección Longitudinal A-A´-Autoría propia</i>	47
Figura 28- <i>Sección Transversal B-B´ -Autoría propia</i>	47
Figura 29- Isométricos-Autoría propia.....	48
Figura 30- Análisis bioclimático-Autoría propia	49
Figura 31- Vanos en fachada-Autoría propia.....	49
Figura 32- Planta área-Autoría propia.....	50
Figura 33- Planta mobiliario-Autoría propia.....	50
Figura 34- Isométrico 1-Autoría propia	52
Figura 35- Isométrico 1-Autoría propia	52
Figura 36- 1er escenario-Autoría propia	62
Figura 37- 2do escenario-Autoría propia	62
Figura 38- 3er escenario-Autoría propia	63
Figura 39- 4to escenario-Autoría propia	63
Figura 40- 1er escenario-Autoría propia	64
Figura 41- 2do escenario-Autoría propia	64
Figura 42- 3er escenario-Autoría propia	65
Figura 43- 4to escenario-Autoría propia	65
Figura 44- 1er escenario (panel rígido)-Autoría propia	66

Figura 45 -2do escenario (panel rígido)-Autoría propia	66
Figura 46 -3er escenario (panel rígido)-Autoría propia	67
Figura 47 -4to escenario (panel rígido)-Autoría propia	67
Figura 48 -1er escenario (Bolsillos)-Autoría propia	68
Figura 49 -2do escenario (Bolsillos)-Autoría propia	68
Figura 50 -3er escenario (Bolsillos)-Autoría propia	69
Figura 51 -4to escenario (Bolsillos)-Autoría propia	69
Figura 52 -Fuentes de ruido1-Autoría propia.....	72
Figura 53 - Fuentes de ruido1-Autoría propia.....	72
Figura 54 -Mapa mental muro verde-Autoría propia	75
Figura 55 -Idea conceptual-Autoría propia	76
Figura 56 -Corte por fachada-Autoría propia.....	76
Figura 57 -Planta final-Autoría propia.....	76



Figura 58 -Isométrico final-Autoría propia	77
---	----

Figura 59-Render final 1-Autoría propia77

Figura 60- Render final 3-Autoría propia78

Figura 61- Render final 2-Autoría propia78

Figura 62- Render final 4-Autoría propia79

Figura 63- Render final 5-Autoría propia79

Siglas, acrónimos y abreviaturas

APA	American Psychological Association
Db	Decibeles
UPB	Universidad Pontificia Bolivariana

Resumen

El presente trabajo de investigación aborda el problema del confort acústico en espacios educativos expuestos al ruido urbano, tomando como referencia los salones del Bloque 10 de Arquitectura de la Universidad Pontificia Bolivariana, los cuales se ven afectados por los altos niveles de ruido generados por la Avenida Bolivariana. Esta condición incide en el comportamiento acústico del aula, generando un mayor esfuerzo para lograr la inteligibilidad de la palabra durante el desarrollo de las clases. La investigación tiene como objetivo analizar y diseñar una propuesta de infraestructura verde en fachada que permita mejorar las condiciones de acondicionamiento y confort acústico, mediante la aplicación de vegetación con diferentes densidades, formas y distribuciones. El estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, combinando métodos cuantitativos, como mediciones acústicas con sonómetro y cálculos teóricos, con métodos cualitativos, como encuestas aplicadas a docentes y estudiantes para identificar la percepción del ruido y los puntos de mayor afectación. Los resultados esperados buscan demostrar la eficacia de los muros verdes como estrategia pasiva de acondicionamiento acústico, mejorando la acústica arquitectónica de los salones y contribuyendo al bienestar ambiental, estético y cognitivo. Este estudio propone una solución sostenible que integra la vegetación como herramienta funcional y estética para la mitigación del ruido, fortaleciendo la relación entre diseño, sostenibilidad y confort acústico. En síntesis, se evidenció una mejora en el acondicionamiento acústico del aula, reflejada en una mayor claridad en la transmisión de la palabra, una mejor percepción del entorno sonoro por parte de los usuarios y condiciones más adecuadas para el desarrollo de las actividades académicas, lo que permite reflexionar sobre la pertinencia de implementar estrategias de infraestructura verde como solución efectiva y sostenible frente a la contaminación acústica en entornos educativos.

Palabras clave: confort acústico, acondicionamiento acústico, acústica arquitectónica, infraestructura verde, sostenibilidad, espacios educativos.

Abstract

This research addresses the issue of acoustic comfort in educational spaces exposed to urban noise, taking as a case study the classrooms of Block 10 of the School of Architecture at the Universidad Pontificia Bolivariana, which are affected by the noise generated by Avenida Bolivariana. This condition impacts the acoustic behavior of the classroom, requiring greater effort to achieve speech intelligibility during lectures. The aim of this study is to analyze and design a green façade infrastructure proposal that improves acoustic conditioning and comfort conditions through the application of vegetation with different densities, forms, and distributions.

The study follows a mixed-methods approach, combining quantitative methods—such as acoustic measurements using a sound level meter and theoretical calculations—with qualitative methods, including surveys conducted with teachers and students to identify noise perception and the most affected areas. The expected results seek to demonstrate the effectiveness of green walls as a passive acoustic conditioning strategy, enhancing the architectural acoustics of classrooms and contributing to environmental, aesthetic, and cognitive well-being.

This study proposes a sustainable solution that integrates vegetation as both a functional and aesthetic tool for noise mitigation, strengthening the relationship between design, sustainability, and acoustic comfort. In summary, an improvement in the acoustic conditioning of the classroom was evidenced, reflected in greater speech clarity, a better perception of the acoustic environment by users, and more suitable conditions for the development of academic activities. These findings highlight the relevance of implementing green infrastructure strategies as an effective and sustainable solution to address acoustic challenges in educational environments.

Keywords: acoustic comfort, acoustic conditioning, architectural acoustics, green infrastructure, sustainability, educational environments.

Introducción

El confort acústico es un componente esencial dentro de los espacios educativos, pues influye de manera directa en la concentración, el aprendizaje y el bienestar de los estudiantes. En ciudades con alta densidad vehicular, los espacios académicos se ven expuestos a niveles de ruido que superan los límites normativos, generando distracciones y afectando la calidad del ambiente sonoro. Según estudios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019), los niveles de ruido diurnos en corredores urbanos principales superan los 70 dB, cuando la normativa nacional fija un máximo de 65 dB para zonas educativas.

Ante este escenario, la infraestructura verde se presenta como una solución arquitectónica sostenible que controlar la transmisión sonora y regular el comportamiento acústico del espacio, mejorar el microclima y fortalecer la relación entre arquitectura y naturaleza. Investigaciones de Azkorra et al. (2015) y Yang, Kang y Cheal (2011) confirman que los muros verdes pueden disminuir el ruido urbano entre 5 y 10 dB, dependiendo de la configuración vegetal y su densidad.

El confort acústico constituye un factor determinante en la calidad del ambiente educativo, ya que incide en la concentración, el rendimiento académico y el bienestar psicológico de los estudiantes. En el caso del Bloque 10 de Arquitectura de la Universidad Pontificia Bolivariana, los niveles de ruido generados por el tráfico vehicular de la Avenida Bolivariana superan los límites establecidos por la Resolución 627 de 2006 (MinAmbiente), que fija un máximo de 65 dB para zonas educativas. Mediciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019) registran valores superiores a 70 dB, evidenciando una exposición sonora perjudicial.

Frente a esta problemática, se plantea la incorporación de infraestructura verde como alternativa de acondicionamiento acústico, aprovechando las propiedades absorbentes de la vegetación para reducir el tiempo de reverberación de los espacios interiores. Estudios como los de Azkorra et al. (2015) y Yang, Kang y Cheal (2011) demuestran que los muros verdes pueden mejorar las condiciones acústicas del espacio, además de contribuir al bienestar ambiental y estético.

La investigación adopta una metodología mixta y aplicada, que combina la obtención de datos reales mediante mediciones acústicas y encuestas perceptivas, con el cálculo teórico mediante la fórmula de sabine. Este proceso se estructura en tres fases: diagnóstico del estado actual, evaluación del impacto de la vegetación y diseño de una propuesta arquitectónica de fachada verde.

El propósito de esta investigación es analizar y diseñar una propuesta de fachada verde para el Bloque 10 que mejore las condiciones acústicas de los salones ubicados en los pisos primero y cuarto, considerando la densidad, forma y distribución de las especies vegetales. De este modo, el proyecto busca consolidar un espacio académico más confortable, eficiente y armónico con su contexto urbano, demostrando que la aplicación de infraestructura verde no solo mejora las condiciones de acondicionamiento acústico, sino que también aporta al bienestar ambiental, estético y social del entorno educativo.

1 Planteamiento del problema

El Bloque 10 de Arquitectura de la UPB presenta una deficiencia en el confort acústico debido al ruido vehicular proveniente de la Avenida Bolivariana, lo cual afecta directamente la concentración de los estudiantes y el adecuado desarrollo de las actividades académicas. Este problema se ve agravado por la falta de estrategias que actúen como elementos de control del comportamiento acústico en la fachada, como la implementación de infraestructura verde a través de capas vegetales o barreras naturales, que pueden contribuir a mejorar el acondicionamiento acústico del espacio, favoreciendo una mejor calidad del ambiente sonoro en el interior de los salones.

“La ausencia de estas soluciones no solo genera incomodidad, sino que también tiene efectos nocivos en el aprendizaje, la concentración y la calidad del ambiente educativo.” (Aletta, Kang & Axelsson, 2016, p. 5; Kang, 2007, p. 22).”. Esto se evidencia en los datos del Mapa de Ruido del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019), que registran niveles diurnos superiores a los 70 dB en zonas cercanas a vías arteriales como la Avenida Bolivariana, cuando la Resolución 627 de 2006 del Ministerio de Ambiente establece un límite máximo de 65 dB para zonas educativas. La OMS (1999) recomienda incluso que el ruido dentro de las aulas no supere los 35 dB, dado su impacto en el rendimiento académico y la salud auditiva.

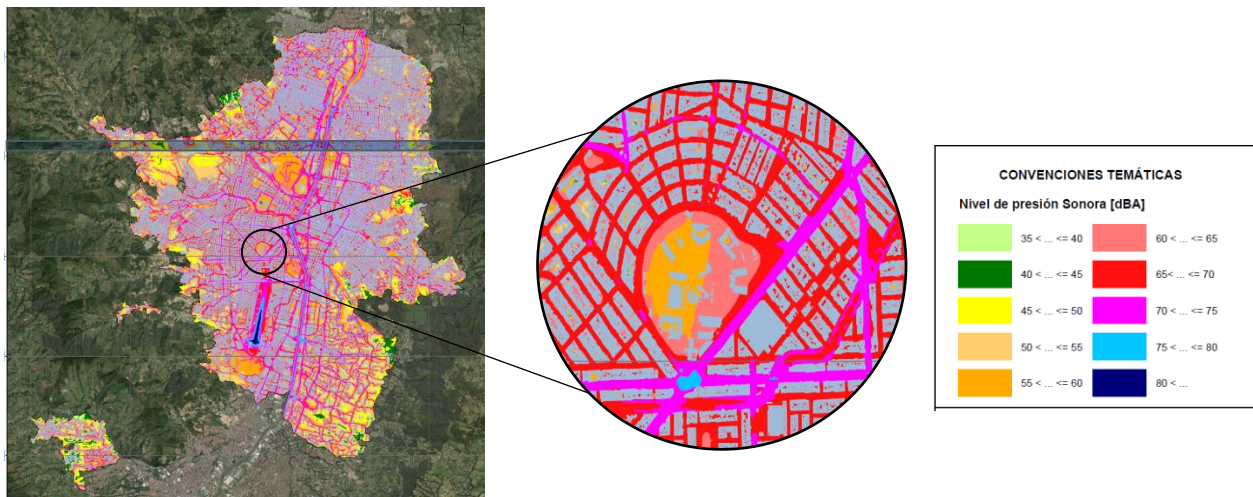


Figura 1–Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). Informe Medellín: Mapa de ruido ambiental.

Autores como Kang (2007) sostienen que “la calidad del ambiente acústico urbano depende tanto de los niveles de ruido como Figura 1 de las percepciones sociales” (p. 22), lo que refuerza que este tipo de contaminación afecta no solo la salud física, sino también el bienestar cognitivo y emocional. De igual manera, García et al. (2011) comprobaron mediante simulaciones en Medellín que el tránsito automotor es la principal fuente de contaminación acústica, siendo los corredores viales los sectores con mayores impactos. Estos estudios respaldan la necesidad de implementar estrategias arquitectónicas que reduzcan la exposición al ruido en espacios educativos como el Bloque 10

Pregunta de investigación:

¿Cómo la integración de infraestructura verde en la fachada del Bloque 10 de Arquitectura de la UPB podría mejorar el acondicionamiento acústico del salón 314 del tercer piso, que colinda con la Avenida Bolivariana, considerando la densidad, forma, cantidad y distribución de las especies vegetales?

Antecedentes

En este apartado se presenta una introducción general a los antecedentes que sustentan la investigación. El desarrollo más detallado de estos antecedentes, así como su análisis teórico y contextual, se amplía en los marcos de referencia que se presentan más adelante en el documento.

Tabla 1-Matriz acerca de diferentes autores que proponen el diseño biofílico – Autoría Propia

Autor / Año	Tema	Método / Enfoque	Aportes principales
Aletta, Kang & Axelsson (2016)	Descriptores de paisaje sonoro	Marco conceptual, análisis perceptual	Indicadores subjetivos para evaluar la calidad acústica desde la percepción.
Arenas (2008)	Limitaciones de barreras acústicas	Revisión crítica de casos de transporte	Problemas de las barreras rígidas, justificando alternativas como muros verdes.
Asdrubali, D'Alessandro & Schiavoni (2016)	Materiales sostenibles de aislamiento	Revisión bibliográfica	Analizaron materiales no convencionales, abriendo camino a soluciones vegetales.
Azkorra et al. (2015)	Muros verdes como aislamiento pasivo	Estudio experimental en edificio	Demostraron reducciones hasta 10 dB, confirmando eficacia acústica.
Bakker, Lugten & Tenpierik (2023)	Fachadas verdes como barreras acústicas	Modelos de simulación + casos prácticos	Criterios de diseño (densidad, altura, espesor) para maximizar atenuación.
Barrigón & Gómez (2002)	Paisaje sonoro urbano y tráfico	Medición de ruido urbano	El tráfico condiciona la percepción sonora de la ciudad.
Barron (2010)	Acústica de auditorios	Libro teórico y aplicado	Base técnica para diseño de auditorios y espacios educativos.
Kang (2007)	Entorno sonoro urbano	Libro de referencia	Definió la acústica urbana y el rol del diseño arquitectónico.
Kuttruff (2009)	Acústica de recintos	Libro especializado	Bases sobre propagación y control acústico en recintos cerrados.
Long (2014)	Acústica arquitectónica	Manual aplicado	Ejemplos prácticos para arquitectos sobre acondicionamiento acústico.
Pérez et al. (2010)	Fachadas verdes y energía	Estudio en edificios	Reducción de consumo energético y beneficios pasivos.
Schafer (1977)	Paisaje sonoro	Libro fundacional	Introdujo el concepto de soundscape, clave en acústica y percepción.
Schulte-Fortkamp & Fiebig (2006)	Ruido y percepción social	Estudio en barrio residencial	Conectaron evaluación acústica con bienestar y percepción subjetiva.
Shushunova et al. (2022)	Muros verdes y seguridad acústica	Análisis en edificios + simulaciones	Reducción de ruido y aumento del confort y seguridad.
Tang et al. (2021)	Efectos acústicos de fachadas verdes	Simulación + mediciones en campo	Evaluaron reducción de ruido urbano con vegetación vertical.
Thomazelli, Caetano & Bertoli (2016)	Rendimiento acústico de muros verdes	Ensayos experimentales de laboratorio	Mayor espesor y tipo de sustrato = mejor aislamiento.
Yang, Kang & Choi (2012)	Reducción de ruido con muros verdes	Experimentos en campo	Confirmaron atenuación del ruido ambiental con muros verdes.

2 justificación

El confort acústico es un componente esencial en los espacios educativos, ya que influye directamente en la concentración, el aprendizaje y el bienestar de los estudiantes. En el Bloque 10 de Arquitectura de la UPB, el ruido vehicular proveniente de la Avenida Bolivariana impacta de manera significativa en la calidad del ambiente académico, generando distracciones, fatiga cognitiva y disminución en el rendimiento. Como afirma Aletta, Kang y Axelsson (2016), “el entorno sonoro influye directamente en la percepción del bienestar y en la capacidad de concentración dentro de los espacios interiores” (p. 5), lo que confirma la necesidad de abordar este tipo de problemáticas desde el diseño arquitectónico. Abordar esta situación resulta fundamental porque permite proponer estrategias sostenibles que, además de regular las condiciones acústicas del espacio, aportan beneficios ambientales, estéticos y de bienestar general. La incorporación de infraestructura verde en la fachada, mediante barreras vegetales, se plantea como una solución innovadora y viable. Este tipo de estrategia no solo modula la incidencia sonora proveniente del exterior, sino que también mejora la calidad del aire, regula la temperatura y refuerza la relación de los estudiantes con la naturaleza en un entorno urbano denso. Según Yang, Kang y Cheal (2011), “los muros verdes no solo mejoran el microclima urbano, sino que también contribuyen significativamente a la reducción de ruido” (p. 150). Además, aporta un valor estético que renueva la imagen del edificio, generando una percepción más agradable y saludable del espacio académico.

Entre las especies vegetales más aptas para este tipo de intervención se encuentran aquellas con follajes densos y capacidad de absorción acústica, como por ejemplo el ficus benjamina, la trinitaria, el jazmín trepador o el bambú, que permiten conformar pantallas vegetales efectivas y de bajo mantenimiento. En síntesis, esta propuesta integra sostenibilidad, funcionalidad y diseño, ofreciendo una alternativa que responde tanto a la necesidad de optimizar el comportamiento acústico del espacio como al propósito de enriquecer el ambiente académico, consolidando el Bloque 10 como un espacio más confortable, eficiente y armónico con su contexto. Como señalan Azkorra et al. (2015), “los muros verdes pueden ser utilizados como sistemas pasivos, contribuyendo significativamente al acondicionamiento de un espacio” (p. 46).

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Diseñar una propuesta de infraestructura verde en la fachada del bloque 10 de arquitectura que, según la disposición y caracterización de la vegetación, mejore el confort acústico de los salones que colindan con la avenida Bolivariana.

3.2 Objetivos específicos

1-Analizar las condiciones acústicas actuales del salón 314 del tercer piso del bloque 10, que colinda con la avenida bolivariana en relación con el acondicionamiento acústico.

2-Evaluar el impacto de la vegetación en fachada según su densidad, forma, cantidad y distribución en el mejoramiento del acondicionamiento acústico.

3-Proponer un diseño de infraestructura verde en fachada que optimice el confort acústico en los salones, integrando la vegetación como un mecanismo efectivo para el acondicionamiento acústico.

4 Hipótesis

4.1 Hipótesis de trabajo

La incorporación de infraestructura verde en la fachada del Bloque 10 de Arquitectura de la Universidad Pontificia Bolivariana, mediante el uso de vegetación con diferentes densidades y configuraciones, mejorará el confort acústico de los salones que colindan con la avenida Bolivariana, mejorando el acondicionamiento acústico frente a las condiciones del entorno exterior y generando un ambiente interior más confortable para los usuarios y confort acústico.

4.1.1 Hipótesis nula

La implementación de infraestructura verde en la fachada del Bloque 10 no producirá cambios significativos en el confort acústico de los salones, manteniéndose los niveles de ruido y la percepción sonora de los usuarios sin variaciones relevantes.

4.1.1.1. Variables.

- Variable independiente: Aplicación de infraestructura verde en fachada (densidad, forma, cantidad y distribución de la vegetación).
- Variable dependiente: Nivel de confort acústico en los salones (evaluado por mediciones sonoras y encuestas perceptivas).
- Variables de control: Material de fachada existente, ubicación del aula, tráfico vehicular y hora del día.

5 Marco Teórico-Conceptual

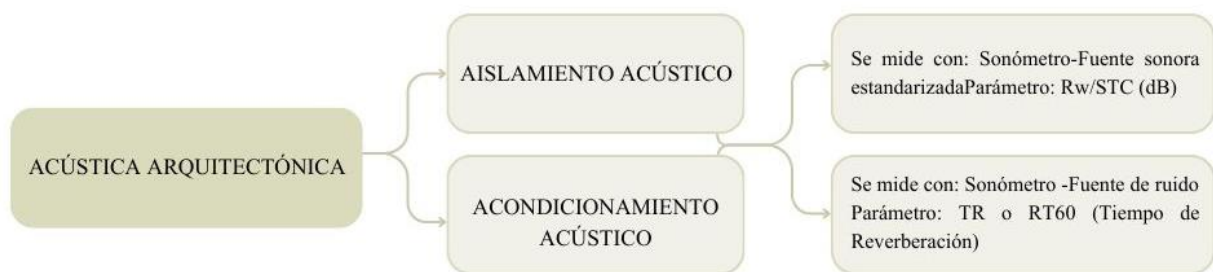


Figura 2-Mapa mental acerca de los conceptos principales– Autoría Propia

Capítulo 1. Fundamentos de la acústica

La acústica se entiende como la ciencia que estudia cómo se produce, transmite y percibe el sonido, abarcando desde las vibraciones de muy baja frecuencia (infrasonidos) hasta las más altas (ultrasonidos), sin dejar de lado las frecuencias audibles por el ser humano. Su análisis implica el uso de parámetros específicos como la presión sonora, la frecuencia, la intensidad o el tiempo de reverberación. Estos fenómenos no se cuantifican de manera subjetiva, sino mediante equipos especializados que permiten expresarlos en unidades como los decibelios (dB). Entre los instrumentos más relevantes se encuentran el sonómetro, el micrófono de medición, el analizador de espectro y los dosímetros, todos ellos fundamentales para comprender y regular el comportamiento del sonido en los espacios donde las personas desarrollan sus actividades cotidianas.

Como señala Kuttruff, “*el sonido se define como una fluctuación de presión en un medio elástico, que puede describirse mediante parámetros físicos y matemáticos*” (Kuttruff, 2009, p. 3). Este planteamiento resulta clave, porque recuerda que hablar de sonido en arquitectura no puede basarse únicamente en percepciones sensoriales, sino que requiere de bases científicas para diseñar espacios con condiciones acústicas predecibles.

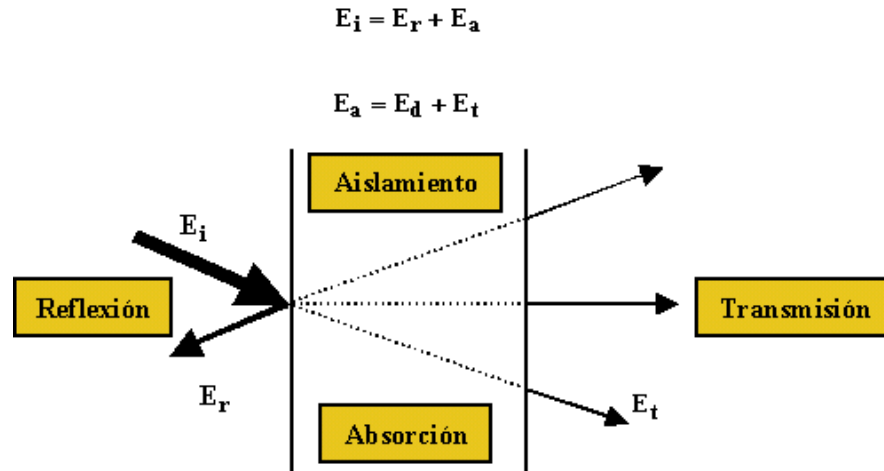


Figura 3-Esquema de los procesos de reflexión, absorción y transmisión del sonido. Adaptado de “¿Hay contaminación acústica?”, Estamos en la Onda (s. f.),

• Capítulo 2. La acústica en la arquitectura

Al entender cómo funciona el sonido desde lo físico, es posible dar un paso hacia su integración en el diseño de los espacios construidos. *"Los principios fundamentales del diseño acústico deben garantizar que la inteligibilidad, la claridad y la calidad sonora se mantengan en cualquier punto del espacio"* (Barron, 2010, p. 45).

En el campo de la arquitectura, la acústica adquiere un papel determinante, pues se convierte en una herramienta para configurar espacios que no solo cumplen funciones visuales o estructurales, sino que también responden a las necesidades sonoras de sus usuarios. La acústica arquitectónica se centra en garantizar una propagación adecuada y funcional del sonido dentro de los recintos, lo cual resulta esencial en lugares como auditorios, salas de conciertos, teatros, aulas o espacios de grabación.

Long (2014) enfatiza que *"el acondicionamiento acústico requiere equilibrar absorción, difusión y reflexión"* (p. 78), lo que demuestra que los principios físicos deben ser parte integral del diseño arquitectónico. Esta relación entre sonido y espacio construye una visión donde el confort acústico se convierte en una necesidad de todo espacio. Además, Barron (2010) establece que la acústica

arquitectónica debe priorizar la inteligibilidad del habla y la claridad musical como dos objetivos inseparables, y en esa medida, los espacios no deberían pensarse solo desde lo estético.

Dentro de esta disciplina, dos aspectos resultan fundamentales: el aislamiento acústico y el acondicionamiento acústico:

- **Capítulo 3. Aislamiento acústico**

Tras comprender la importancia de diseñar espacios que favorezcan una buena propagación sonora, también surge la necesidad de protegerlos de los ruidos no deseados. El aislamiento acústico se entiende como la capacidad que tienen ciertos materiales o sistemas constructivos para impedir que el sonido atraviese de un espacio a otro, garantizando condiciones de privacidad, concentración y confort. Este aislamiento puede dirigirse tanto a ruidos aéreos como conversaciones, música o tráfico, como a ruidos de impacto, tales como golpes o vibraciones transmitidas por las estructuras. La eficacia del aislamiento depende en gran medida **de la densidad y la masa de los materiales**. Como indica Kuttruff, *“los problemas de aislamiento no solo dependen de la elección de materiales, sino también de los detalles constructivos”* (2009, p. 210). Actualmente, más allá de los sistemas tradicionales, se promueven soluciones innovadoras, sostenibles y ecológicas, como las fachadas verdes. Pérez et al. (2010) mostraron que *“los sistemas vegetales aplicados en fachadas logran mejorar de manera significativa el aislamiento acústico aéreo”* (p. 846).



Figura 4-Montaje experimental de fachada verde para estudio de aislamiento acústico. Adaptado de “Green vertical systems for buildings as passive acoustic insulation,” por G. Pérez

Asimismo, Thomazelli, Caetano y Bertoli (2016) destacaron que *“los muros verdes presentan un comportamiento acústico variable según el sustrato y el espesor del sistema”* (p. 5). Esto confirma que los muros verdes funcionan como una estrategia efectiva para impedir la propagación del ruido en los espacios urbanos y arquitectónicos. Lo que se requiere es una investigación detallada sobre el tipo de plantas y la densidad del follaje, ya que no todas las especies ofrecen la misma absorción sonora. En el estudio, por ejemplo, se evaluaron configuraciones con especies de follaje denso como *Hedera helix* (hiedra común) y *Ficus pumila*, junto con sustratos de entre 8 y 15 cm de espesor, alcanzando coeficientes de absorción cercanos a 1.0 en frecuencias de 1000 Hz y mejoras de hasta 2 dB en aislamiento. Estos resultados dejan claro que, con la elección adecuada de vegetación y un espesor bien diseñado, los muros verdes pueden superar incluso a materiales convencionales en el control acústico. Sin embargo, a pesar de que diversas investigaciones evidencian el efecto de la vegetación en el aislamiento acústico, la presente investigación se enfoca en el acondicionamiento acústico, priorizando la mejora de las condiciones sonoras interiores y la calidad del ambiente acústico en los espacios educativos.



Figura 5-*Hedera helix* (hiedra común)



Figura 6-*Ficus pumila*

- **Capítulo 4. Acondicionamiento acústico**

El aislamiento resuelve la relación con los sonidos externos, pero dentro de los espacios también se deben garantizar condiciones óptimas para la percepción del sonido. El acondicionamiento acústico se centra en mejorar la calidad del sonido dentro de un espacio, diferenciándose del aislamiento, cuyo objetivo es impedir la transmisión sonora entre recintos. Este aspecto se relaciona con la manera en que las personas perciben e interpretan los sonidos de su entorno.

El origen del acondicionamiento acústico se remonta a finales del siglo XIX con los estudios de Wallace Clement Sabine, considerado el padre de la acústica arquitectónica moderna. Sabine demostró que la proporción de energía absorbida por las superficies de un espacio está directamente relacionada con el tiempo de reverberación, estableciendo así las bases para diseñar recintos con condiciones acústicas controladas. Según él, *“el tiempo de reverberación es la medida más importante de la acústica de una sala”* (Sabine, 1922, p. 11).

En la misma línea, Long (2014) resalta que *“los recintos deben diseñarse considerando la interacción entre absorción, difusión y reflexión”* (p. 82). Estos principios siguen siendo vigentes y constituyen el fundamento del diseño acústico en aulas, auditorios y otros espacios donde la calidad sonora resulta esencial.

- **Capítulo 5. Ambiente acústico y paisaje sonoro**

Más allá de lo que ocurre dentro de los recintos, también es fundamental hablar sobre cómo los sonidos configuran la experiencia de los espacios abiertos. **El ambiente acústico** va más allá de los recintos cerrados y se refiere al conjunto de sonidos que conforman un lugar. No se trata únicamente de medir la intensidad de esos sonidos, sino de entender cómo son percibidos por las personas y de qué manera influyen en su bienestar.

De esta noción surge el concepto de **paisaje sonoro**, entendido como el ambiente acústico tal y como es experimentado, interpretado o valorado en un contexto específico. Tal como explica Schafer, *“el paisaje sonoro es un conjunto de eventos escuchados, no objetos vistos”* (1977, p. 7).

Kang (2007) complementa esta visión al afirmar que *“la calidad del ambiente acústico urbano depende tanto de los niveles de ruido como de las percepciones sociales”* (p. 22). De manera complementaria, Aletta et al. (2016) propusieron descriptores de paisaje sonoro que consideran la percepción, señalando que *“los indicadores subjetivos permiten evaluar la calidad acústica con mayor precisión que los meramente físicos”* (p. 15). Este enfoque resulta especialmente valioso, ya que reconoce que el confort acústico no se reduce a cifras técnicas o decibeles, sino que también

se relaciona con la experiencia cotidiana de los usuarios. En ese sentido, la investigación en torno al paisaje sonoro ha abierto un campo necesario: entender el ambiente acústico como un fenómeno integral donde los aspectos físicos y perceptivos deben analizarse de manera conjunta.

En el caso de las aulas y ambientes educativos, el paisaje sonoro determina la claridad con la que los estudiantes escuchan al profesor y participan en clase, lo que evidencia la importancia del diseño arquitectónico para crear entornos acústicos positivos.

- **Capítulo 6. Infraestructura verde y confort acústico**

Finalmente, si se entiende que los sonidos forman parte del ambiente urbano, también resulta necesario explorar estrategias que permitan mitigarlos y, al mismo tiempo, mejorar la calidad del espacio. *"Los muros verdes no solo mejoran el microclima urbano, sino que también contribuyen significativamente a la reducción de ruido"* (Yang, Kang & Cheal, 2011, p. 150).



Figura 7-Esquema experimental del comportamiento acústico de fachadas verdes. Azkorra et al. (2015)

La infraestructura verde en la arquitectura ha pasado de ser un elemento meramente ornamental a convertirse en un componente fundamental para el confort ambiental, social y acústico de los espacios urbanos. Se entiende como una red de áreas naturales, seminaturales y sistemas vegetales estratégicamente planificados que no solo aportan beneficios ecológicos, sino que también cumplen un papel clave en la reducción de la contaminación acústica.

La vegetación funciona como un filtro natural capaz de absorber y dispersar ondas sonoras, regulando la percepción del ruido y mejorando la calidad del paisaje sonoro en la ciudad. Bakker, Lugten y Tenpierik (2023) señalaron que *“las fachadas verdes actúan como barreras acústicas que mejoran el confort en entornos urbanos densos”* (p. 12).

Al mismo tiempo, árboles, arbustos o muros verdes actúan como barreras naturales que absorben, difunden o atenúan el sonido, generando atmósferas más tranquilas. En esta línea, Azkorra et al. (2015) comprobaron experimentalmente que *“los muros verdes pueden ser utilizados como sistemas pasivos de aislamiento acústico, contribuyendo significativamente a la reducción del ruido urbano”* (p. 46).

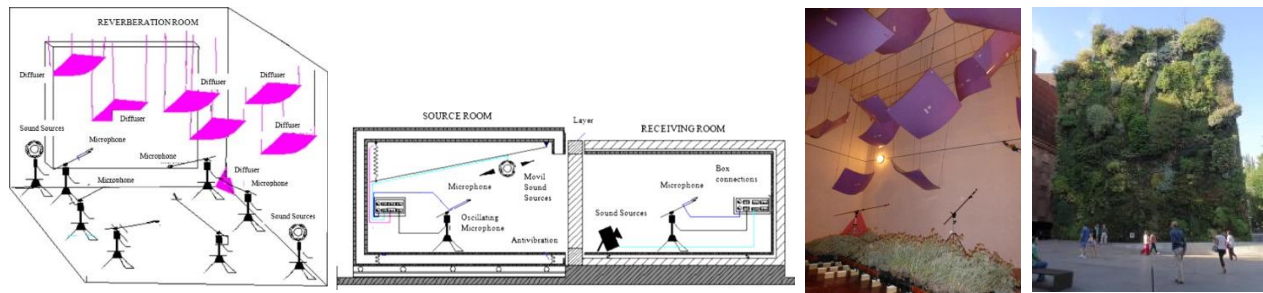


Figura 8-Esquema experimental del comportamiento acústico de fachadas verdes. Azkorra et al. (2015)

De manera complementaria, Shushunova et al. (2022) resaltan que *“el uso de sistemas de muros verdes no solo mitiga el impacto acústico, sino que además refuerza la seguridad y sostenibilidad de los edificios en áreas densamente pobladas”* (p. 2). La selección de especies debe considerar factores formales, ecológicos y económicos, para que la vegetación sea un recurso arquitectónico integral. La vegetación deja de ser un simple adorno y se convierte en un recurso sostenible que aporta confort acústico y calidad espacial en las ciudades contemporáneas.

Parameter	Hydroponic System	Modular System	Container System
Roofing Space	Brackets protruding from the load-bearing wall	Substrate-holding containers	Supporting waterproof metal frame: frame grid, built in frame rack, portable frame rack with guides
Substrate	Horticultural foam, mineral fibre, felt mat	Soil substrate in water permeable, synthetic fibre bag	Soil substrate
Maintenance	Pruning/replacement	Pruning/replacement	Pruning/replacement
Advantages	No structural decay of the growing medium	The growing medium support the plant and facilitates water, providing nutrient access	Irrigation system is connected to the water supply and sewerage system
Disadvantages	Constant management and maintenance	Accumulation of salts in the growing medium, high system weight	

Figura 9-Comparación de las características de diferentes sistemas de muros verdes.Adaptado de “Green vertical systems for buildings as passive acoustic insulation,” por G. Pérez, L. Rincón.

Marco Contextual

El sector de Laureles en Medellín, donde se ubica el Bloque 10 de la Facultad de Arquitectura, presenta una problemática significativa en torno a la contaminación acústica. La avenida Bolivariana constituye una de las principales fuentes de ruido vehicular, producto del tránsito intenso de buses, motocicletas, automóviles y camiones que circulan diariamente. Según el Mapa de Ruido del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, elaborado en el marco de la estrategia *Ciudades contra el ruido*, las zonas aledañas a vías arteriales superan con frecuencia los 70 dB, cuando la normativa colombiana establece un límite máximo de 65 dB en zonas residenciales y educativas (*Resolución 627 de 2006, MinAmbiente*). Esto indica que los niveles de presión sonora que llegan hasta las aulas colindantes del Bloque 10 se encuentran por encima de lo permitido, afectando directamente la calidad del confort acústico de estudiantes y profesores.

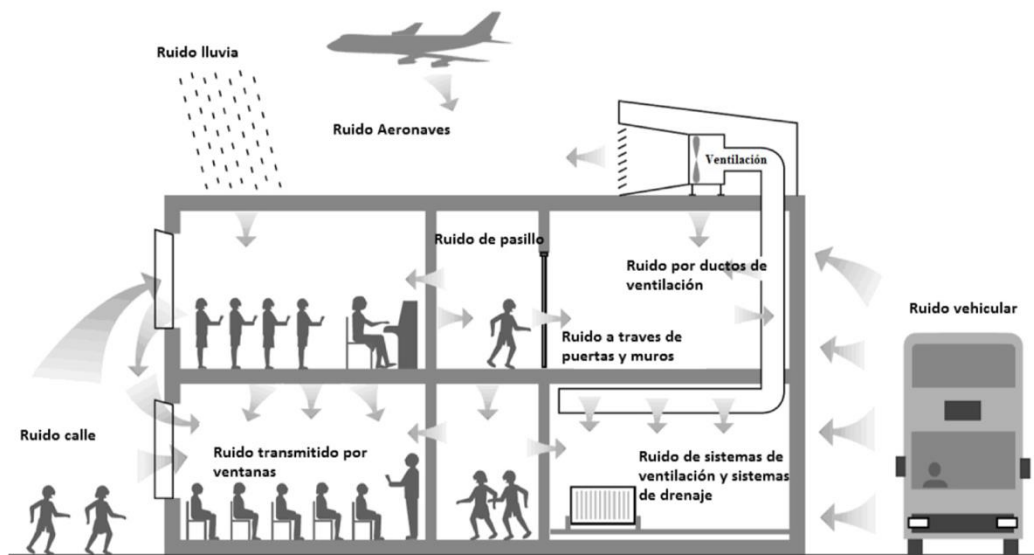


Figura 10-Tipos de ruido que inciden al interior del aula de clase.(Building Bulletin 93,2003)

Normativa:

La normativa nacional es clara en señalar estos límites. La Resolución 627 de 2006 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial fija los valores máximos de presión sonora

permitidos para diferentes áreas. En el caso de las zonas educativas, el límite es de 65 dB en horario diurno y 55 dB en horario nocturno, valores que en la realidad urbana de Medellín se superan con frecuencia en los sectores aledaños a ejes viales de alta circulación. A nivel local, Medellín también ha intentado dar respuesta a esta problemática mediante *el Plan de Ordenamiento Territorial (POT, Decreto 883 de 2014)*, que incluye como directriz el control del ruido en áreas críticas, y *el Plan de Gestión Ambiental Municipal (PGAM 2011–2019)*, donde se establecen políticas para la mitigación del ruido ambiental. La estrategia “Ciudades contra el ruido”, implementada por el Área Metropolitana desde 2010, también forma parte de estas acciones, enfocándose en el monitoreo y la concientización de la población sobre el impacto del ruido. Sin embargo, en la práctica, los

mecanismos de control siguen siendo insuficientes en corredores como la avenida Bolivariana, donde la densidad del tráfico hace difícil el cumplimiento de la norma.

Figura 11-Mapas-Normativas de niveles de ruido ambiental en Medellín-Antioquia

MAPA DE RUIDO DÍA

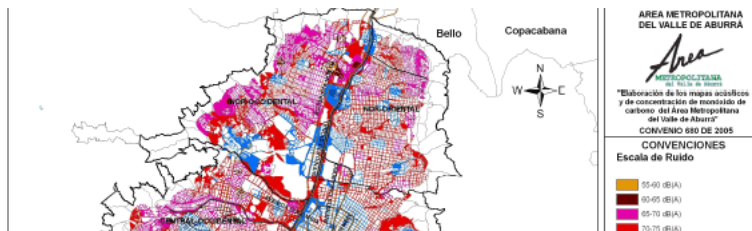


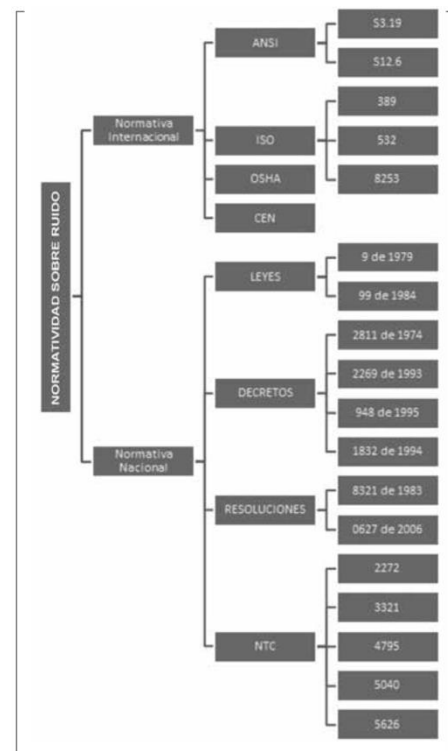
Tabla 12.
Niveles de ruido ambiental por zonas geográficas y usos del suelo en Medellín – Antioquia – Colombia, 2006

Zona Geográfica	Uso del suelo	Niveles de ruido - Día		Niveles de ruido - Noche	
		L_{eq} dB(A)	Comparación con la norma	L_{eq} dB(A)	Comparación con la norma
1 Nor-Oriental	Residencial	65-80	Excede	60-70	Excede
	Equipamientos generales (Institucional)	65-75	Excede	65-70	Excede
2 Nor-Occidental	Residencial	65-80	Excede	60-75	Excede
	Equipamientos generales (Institucional)	70-80	Excede	65-75	Excede
3 Centro-Oriental	Producción de Gran Empresa (Industria)	75-80	Excede	65-75	Excede
	Salud, Ciencia y Tecnología	70-80	Excede	70-75	Excede
4 Centro-Occidental	Residencial	65-80	Excede	65-80	Excede
	Equipamientos generales (Institucional)	70-80	Excede	65-75	Excede
5 Sur-Oriental	Residencial	65-80	Excede	65-75	Excede
	Equipamientos generales (Institucional)	65-80	Excede	65-70	No Excede
6 Sur-Occidental	Producción de Gran Empresa (Industria)	65-75	No Excede	65-70	Excede
	Residencial	65-75	Excede	60-70	Excede
	Equipamientos generales (Institucional)	65-75	Excede	60-70	Excede
	Producción de Gran Empresa (Industria)	65-75	No Excede	60-70	No Excede

Fuente: Yepes et al. (2009).

Sector	Subsector	Estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en dB(A)		Estándares máximos permisibles de niveles de ruido ambiental en dB(A)	
		Día	Noche	Día	Noche
Sector A. Tranquilidad y Silencio	Hospitales, bibliotecas, guardería s, sanatorios, hogares geriátricos.	55	50	55	45
Sector B. Tranquilidad y Ruido Moderado	Zonas residenciales o exclusivamente destinadas para desarrollo habitacional, hotelería y hospedajes.	65	55	65	50
	Universidades, colegios, escuelas, centros de estudio e investigación.				
	Parques en zonas urbanas diferentes a los parques mecánicos al aire libre.				
Sector C. Ruido Intermedio Restringido	Zonas con usos permitidos industriales, como industrias en general, zonas portuarias, parques industriales, zonas francas.	75	75	75	70
	Zonas con usos permitidos comerciales, como centros comerciales, almacenes, locales o instalaciones de tipo comercial, talleres de mecánica automotriz e industrial, centros deportivos y recreativos, gimnasios, restaurantes, bares, tabernas, discotecas, bingos, casinos.	70	60	70	55
	Zonas con usos permitidos de oficinas.	65	55	65	50
	Zonas con usos institucionales.				
	Zonas con otros usos relacionados, como parques mecánicos al aire libre, áreas destinadas a espectáculos públicos al aire libre.	80	75	80	70
Sector D. Zona Suburbana o Rural de Tranquilidad y Ruido Moderado	Residencial suburbana.	55	50	55	45
	Rural habitada destinada a explotación agropecuaria.				
	Zonas de Recreación y descanso, como parques naturales y reservas naturales.				

Tabla 2-Tablas decibeles- Normativas de niveles de ruido



Uso del Suelo	NMP Día dB(A)	NMP Noche dB(A)
Salud, Ciencia y Tecnología	55	45
Residencial	65	50
Equipamientos Generales (Institucional)	65	50
Producción de Gran Empresa (Industrial)	75	70

Figura 12-Mapa de ruido de día-Área Metropolitana del Valle de Aburrá

MAPA DE RUIDO NOCHE

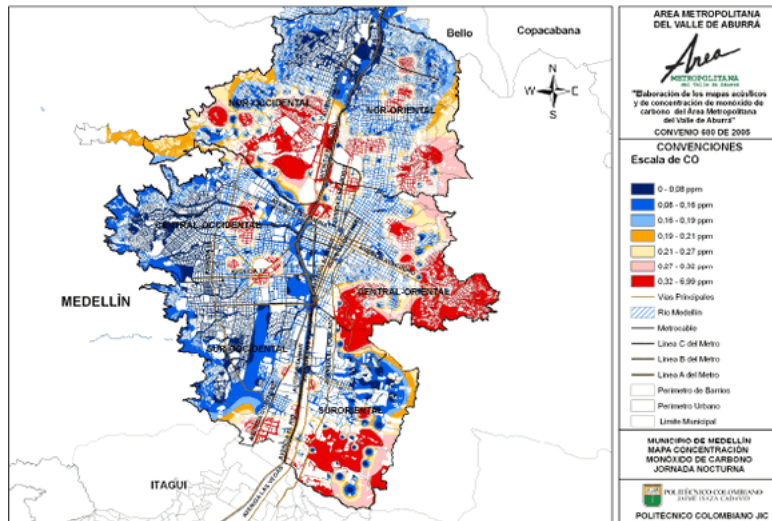


Figura 13-Mapa de ruido de día-Área Metropolitana del Valle de Aburrá

En lo que respecta a los espacios educativos, la normativa internacional también ofrece parámetros estrictos. *La Organización Mundial de la Salud (OMS, 1999)* y *la Unesco (2006)* recomiendan que el ruido dentro de las aulas no supere los 35 dB durante el día, dado que un exceso repercute negativamente en la concentración, la comunicación oral y el rendimiento académico. De manera complementaria, la Secretaría de Educación de Medellín, en el marco de su política de calidad educativa, reconoce que la contaminación acústica es uno de los factores que más afecta los procesos de aprendizaje, por lo cual plantea la necesidad de garantizar condiciones óptimas de confort en los establecimientos escolares. Estas referencias normativas confirman que los espacios destinados a la educación deben contar con soluciones de diseño arquitectónico que permitan un acondicionamiento acústico adecuado frente al ruido urbano.

La investigación de García et al. (2011), publicada en la *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, resulta fundamental en este sentido. Allí se utilizó el software CadnaA para modelar escenarios acústicos en la ciudad, identificando puntos críticos de ruido y evidenciando que la principal fuente de contaminación acústica es el tránsito automotor. Este programa, basado en simulaciones de propagación del sonido, se consolidó como un instrumento muy significativo para diagnosticar la problemática, pues permitió comprobar que las edificaciones próximas a corredores viales presentan los mayores impactos. Los autores concluyen que la incorporación de estrategias de control pasivo como fachadas verdes es clave para la optimización del comportamiento acústico de espacios educativos, reforzando la necesidad de medidas arquitectónicas.



Figura 14- Zonas de la ciudad con más ruido -secretaría de seguridad de Medellín-El colombiano(2024)

Otros estudios ratifican la gravedad de esta situación. El informe “Contaminación por ruido en Medellín” de Ruta N (2018) señala que más del 80 % de la población de la ciudad está expuesta a niveles de ruido superiores a los recomendados por la OMS, que son 55 dB en el día y 45 dB en la noche. El documento también detalla los efectos del ruido sobre la salud: trastornos del sueño, estrés, dificultad de concentración y reducción del rendimiento académico. Esta situación es especialmente crítica en el contexto del Bloque 10, donde el ambiente educativo se ve alterado por la proximidad a la avenida Bolivariana. Asimismo, la Universidad de San Buenaventura (2019) desarrolló un estudio sobre la percepción social del ruido urbano en Medellín, concluyendo que la mayoría de los ciudadanos identifican las vías principales como los focos más problemáticos

y manifestaron la falta de medidas arquitectónicas que mitiguen la intrusión sonora en los espacios habitables.

Frente a este panorama, las soluciones basadas en infraestructura verde en fachada surgen como alternativas con alto potencial. Investigaciones internacionales como las de Azkorra et al. (2015) y Shushunova et al. (2022) han demostrado que la vegetación vertical puede reducir la transmisión sonora hacia los interiores entre 5 y 10 dB, dependiendo de la especie vegetal, su densidad y la configuración del sistema. Estos estudios dejan claro que los muros verdes cumplen no solo una función estética y ambiental, sino también acústica, actuando como barreras naturales que absorben y dispersan las ondas sonoras. Casos de estudio internacionales refuerzan esta idea: la fachada verde del edificio CaixaForum en Madrid ha sido reconocida por mejorar el microclima urbano y atenuar el ruido ambiental; en Bogotá, proyectos piloto de jardines verticales en instituciones educativas han mostrado mejoras perceptibles en la calidad acústica de las aulas. Estos referentes permiten dimensionar el impacto positivo que podrían tener estrategias similares en Medellín, particularmente en el Bloque 10.

La revisión del Mapa de Ruido del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2019) confirma la magnitud de esta problemática, al identificar corredores críticos como la autopista Sur, la avenida Regional y la avenida Bolivariana, con niveles diurnos que superan los 75 dB. Finalmente, la revisión de la normatividad acústica en Colombia realizada por Rojas et al. (2015) resalta cómo, a pesar de los marcos regulatorios existentes, su aplicación y cumplimiento en los entornos urbanos es limitado, lo que refuerza la necesidad de integrar soluciones arquitectónicas efectivas que contribuyan al confort acústico y al bienestar de las comunidades educativas

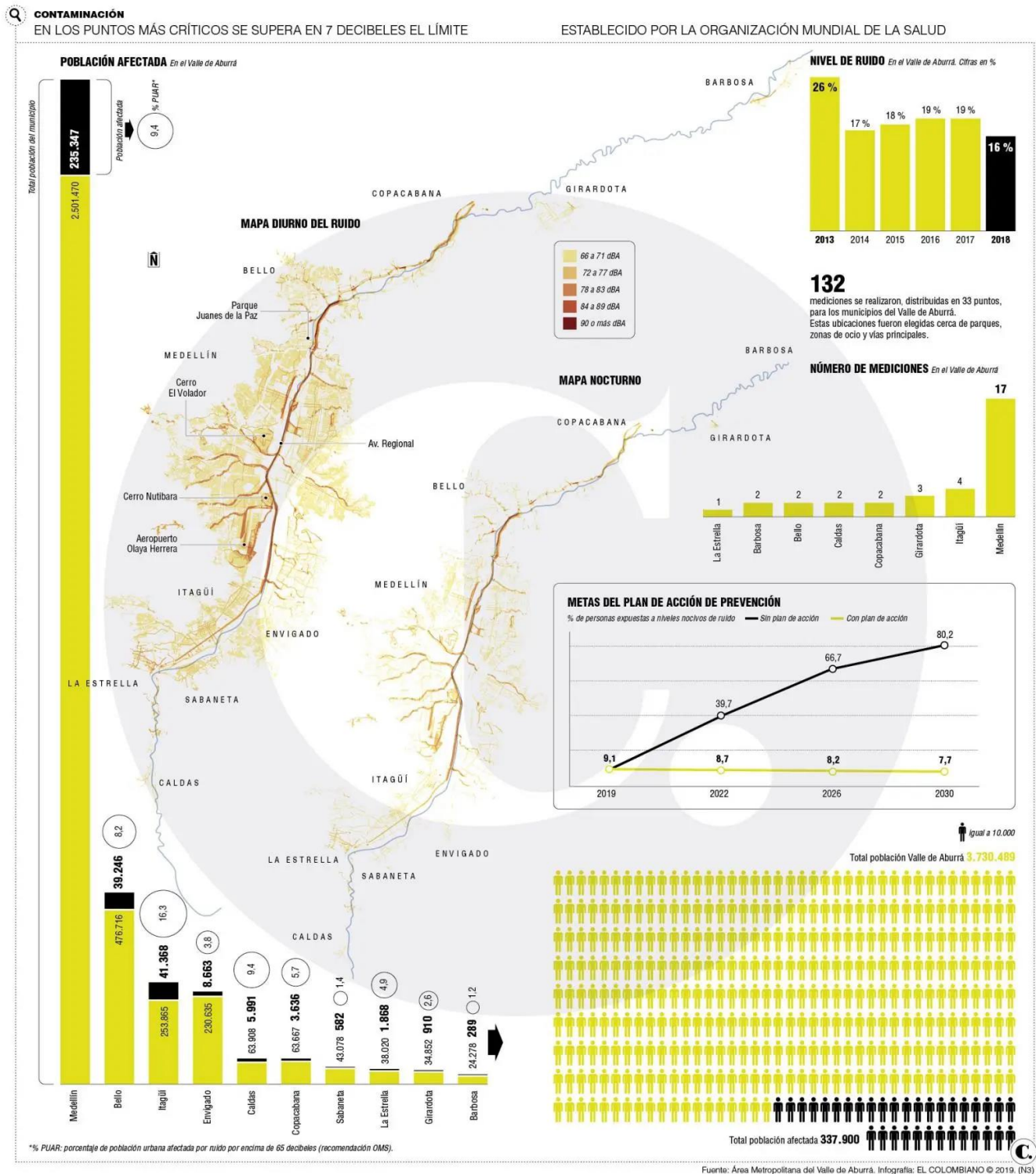


Figura 15-Zonas contaminación auditiva -Área Metropolitana del Valle de Aburrá-Elcolombiano(2024)

6 Metodología

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, integrando métodos cuantitativos y cualitativos con el fin de comprender y evaluar el acondicionamiento acústico del salón 314 del tercer piso del bloque 10, ubicado junto a la avenida Bolivariana. El enfoque cuantitativo adquiere mayor relevancia, ya que la investigación se apoya en la medición objetiva de los niveles de ruido mediante instrumentos técnicos como el sonómetro y software de simulación acústica. Sin embargo, el enfoque cualitativo también tiene un papel esencial, pues a través de encuestas y análisis perceptivos de usuarios se complementa la comprensión técnica con la experiencia humana del sonido, lo cual enriquece la propuesta de diseño arquitectónico y la integración de infraestructura verde.

Aspecto	METODOLOGÍA CUALITATIVA	METODOLOGÍA CUANTITATIVA
Propósito	Comprender la percepción y experiencia sonora de los usuarios en los salones frente al ruido proveniente de la avenida Bolivariana.	Medir de forma objetiva y numérica los niveles de ruido y el impacto de las estrategias de acondicionamiento acústico.
Método principal	Observación, entrevistas y encuestas con preguntas abiertas para conocer cómo los usuarios perciben el confort acústico.	Uso de instrumentos de medición y simulación digital para registrar, comparar y analizar datos acústicos.
Herramientas utilizadas	Encuestas estructuradas a docentes y estudiantes, observaciones directas del comportamiento del espacio	Sonómetro, software de simulación acústica (CATT-Acoustic, SoundPLAN), AutoCAD, Revit, SketchUp y Excel.
Tipo de datos obtenidos	Descripciones, opiniones y valoraciones subjetivas sobre el ambiente sonoro y su relación con el bienestar en el aula.	Valores cuantificables de presión sonora, frecuencias, niveles de absorción y reducción del ruido.
Análisis de datos	Interpretación de respuestas y categorización de percepciones para identificar patrones de molestia o confort.	Tabulación de resultados, elaboración de gráficos comparativos y análisis estadístico de los valores acústicos.

Figura 16-Matriz acerca clasificación de los métodos empleados en la investigación según su enfoque cualitativo o cuantitativo, – Autoría Propia

El proceso se organiza en tres fases principales, correspondientes a los objetivos planteados:

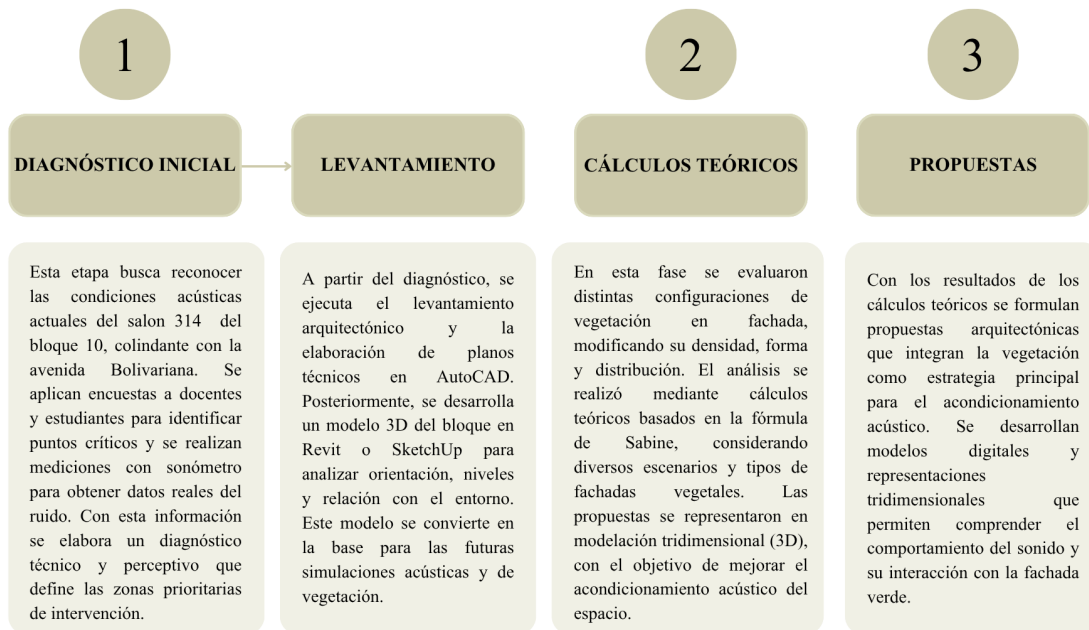


Figura 17-Matriz acerca de las fases de la metodología

Fase 1: Diagnóstico acústico inicial

En esta etapa se realiza un análisis detallado de las condiciones acústicas actuales del salón 314 del tercer piso. Se aplican encuestas a estudiantes y docentes para identificar la percepción del ruido y los puntos más críticos dentro del espacio. Posteriormente, se efectúan mediciones acústicas con sonómetro para obtener datos cuantitativos de los niveles de presión sonora. El análisis comparativo de ambos resultados permite elaborar un diagnóstico técnico y perceptivo que servirá como base para las fases siguientes.

Fase 2: Evaluación del impacto de la vegetación

Una vez obtenido el diagnóstico, se lleva a cabo el levantamiento técnico del espacio y la elaboración de planos en AutoCAD, seguidos del modelado tridimensional (3D) en programas como Revit o SketchUp. En esta fase se realizan simulaciones acústicas que analizan el efecto de

diferentes configuraciones de vegetación en fachada, considerando su densidad, forma, cantidad y distribución. Además, se evalúan alternativas interiores, como la incorporación de vegetación o la reubicación del mobiliario, para determinar la combinación más eficiente que optimice el confort acústico.

Fase 3: Desarrollo de propuestas a partir del análisis teórico acústico

A partir de los resultados obtenidos mediante cálculos teóricos basados en la fórmula de Sabine, se formulan propuestas arquitectónicas que integran la vegetación como estrategia de acondicionamiento acústico. Estas propuestas consideran diferentes configuraciones, densidades y tipos de fachadas vegetales, evaluadas en diversos escenarios. Su desarrollo se realiza mediante modelos digitales y representaciones tridimensionales, que permiten comprender el comportamiento del sonido y su interacción con la fachada verde. La fase culmina con la evaluación comparativa de las soluciones planteadas y la presentación del informe final, que expone los hallazgos, resultados y conclusiones del proceso.

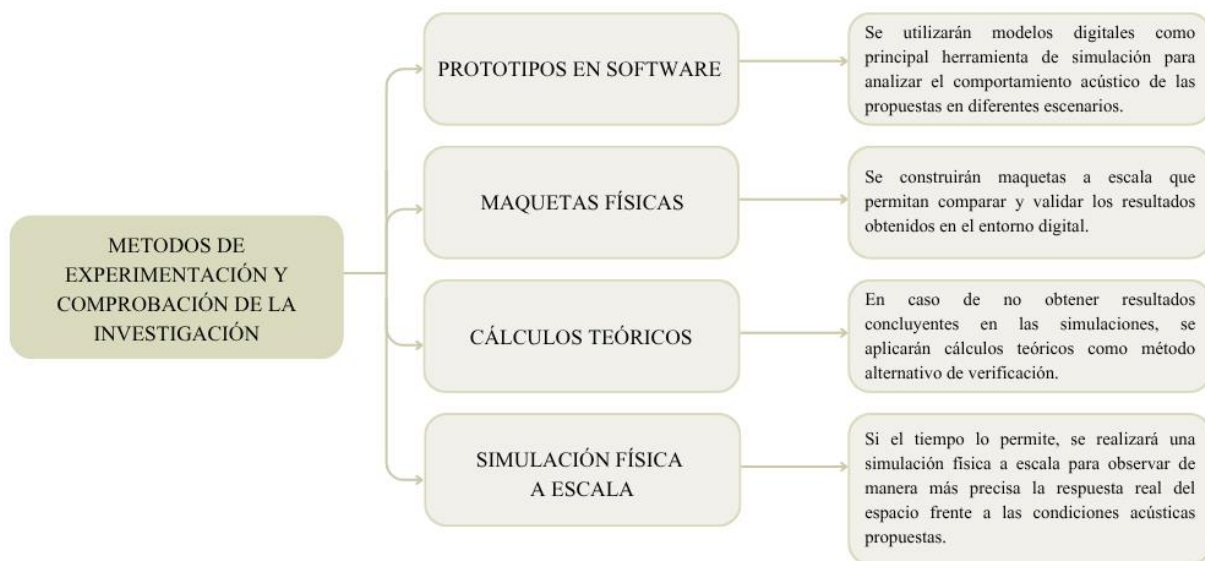


Figura 18-Mapa mental de los métodos de experimentación de la investigación

Técnicas e instrumentos de recolección de información

- Encuestas estructuradas: dirigidas a estudiantes y docentes para conocer la percepción del ruido, la molestia acústica y los puntos de mayor afectación.
- Mediciones acústicas: mediante el uso de un sonómetro, para cuantificar los niveles de ruido en los distintos salones y validar los datos perceptivos.
- Simulaciones digitales: empleando programas como CATT-Acoustic, SoundPLAN o Revit, para analizar el comportamiento del sonido frente a distintas condiciones de vegetación y diseño.
- Cálculo acústico y modelación analítica: En el desarrollo de las fases metodológicas se aplicó esta técnica, principalmente en las Fases 2 y 3, mediante evaluaciones cuantitativas basadas en la fórmula de Sabine para la estimación del tiempo de reverberación (RT60), apoyadas en tablas de coeficientes de absorción por frecuencia (Hz) de materiales constructivos y diferentes tipos de vegetación, obtenidas de investigaciones previas. A partir de este análisis, se evaluaron distintos escenarios y configuraciones de diseño, lo que permitió comprender con mayor precisión el comportamiento acústico del espacio en relación con su geometría, materiales y condiciones propuestas, orientando así las decisiones hacia la mejora del acondicionamiento acústico.
- Modelado 3D: para representar y experimentar con las configuraciones de fachada verde y la disposición interior de los salones.

Análisis de datos

Los datos cuantitativos obtenidos de las mediciones se procesan mediante tablas y gráficos comparativos para identificar patrones de ruido y diferencias significativas entre escenarios. Por su parte, los resultados cualitativos derivados de las encuestas se interpretan a través de análisis descriptivos y categorización de percepciones. Ambos conjuntos de información se integran para sustentar las decisiones de diseño y las simulaciones acústicas.

Validación

La validación del proceso se realiza mediante comparaciones entre el estado actual y los modelos intervenidos, evidenciando el cambio en los niveles de ruido y el grado de confort acústico alcanzado. Asimismo, las percepciones de los usuarios sobre las propuestas se utilizan como criterio de evaluación complementario.

Síntesis

En conjunto, esta metodología permite comprender el problema acústico desde una doble mirada —técnica y humana— y proponer soluciones arquitectónicas sustentadas tanto en datos científicos como en la experiencia sensorial de los usuarios. De este modo, el enfoque mixto asegura una investigación integral orientada no solo al diagnóstico, sino también a la aplicación práctica del conocimiento en el diseño de infraestructuras verdes con propósito acústico y de acondicionamiento.

FASE	ACTIVIDAD	MES	SEMANA	HERRAMIENTAS	RESULTADOS ESPERADOS
1. Análisis de las condiciones acústicas actuales	Realización de encuestas a estudiantes y docentes que frecuentan los salones del 1.º y 4.º piso del bloque 10	Enero	1	Encuestas	Recolección de información sobre la percepción del ruido, identificación de puntos críticos y primeras orientaciones para el diagnóstico acústico y posibles intervenciones.
1. Análisis de las condiciones acústicas actuales	Análisis de los resultados de las encuestas	Enero	2	Tablas comparativas, gráficos de resultados	Determinación de los puntos donde se perciben mayores niveles de ruido y definición de si la intervención debe centrarse solo en fachada o también en el interior.
1. Análisis de las condiciones acústicas actuales	Mediciones del desempeño acústico actual con sonómetro	Enero	3	Sonómetro	Obtención de datos reales del nivel de ruido en cada aula, identificando diferencias entre espacios y validando la información obtenida en las encuestas.
1. Análisis de las condiciones acústicas actuales	Elaboración de diagnóstico acústico inicial	Febrero	4	Registro de campo, análisis de datos	Informe técnico con conclusiones sobre el estado actual del acondicionamiento acústico de los salones.
2. Evaluación del impacto de la vegetación en fachada	Levantamiento del espacio y elaboración de planos técnicos en AutoCAD	Febrero	5	AutoCAD	Representación técnica precisa del bloque 10 y su relación con la avenida Bolivariana.
2. Evaluación del impacto de la vegetación en fachada	Modelado 3D del bloque y los salones para estudiar niveles, orientación y luz	Febrero	6	SketchUp / Revit	Identificación de oportunidades para incorporar vegetación en fachada y zonas de confort interior.
2. Evaluación del impacto de la vegetación en fachada	Diseño y simulación de diferentes configuraciones de vegetación en fachada (densidad, forma, cantidad y ubicación)	Marzo	7	Programas de modelado y simulación acústica (CATT-Acoustic, SoundPLAN o similares)	Evaluación comparativa de las distintas configuraciones vegetales para determinar su efectividad en la reducción del ruido.
2. Evaluación del impacto de la vegetación en fachada	Simulación digital del desempeño acústico de los modelos con vegetación	Marzo	8	Software de simulación acústica	Análisis de cómo la vegetación modifica la propagación del sonido y mejora el confort interior.
2. Evaluación del impacto de la vegetación en fachada	Evaluación de alternativas combinando cambios interiores (mobiliario, vegetación interior)	Marzo	9	Modelado 3D, simuladores acústicos	Identificación de la configuración más eficiente que combine estrategias en fachada e interior.
3. Propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada	Diseño y desarrollo de propuestas arquitectónicas de mejora acústica	Abril	10	Herramientas de diseño digital, maquetas y software de simulación	Propuestas de intervención basadas en los resultados del análisis acústico.
3. Propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada	Elaboración de modelos y prototipos de diseño	Abril	11	Impresión 3D, maquetas físicas	Representaciones físicas y digitales de las propuestas de fachada verde.
3. Propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada	Simulación final del desempeño acústico de los prototipos	Abril	12	Software de simulación acústica	Validación del impacto acústico positivo de las intervenciones.
3. Propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada	Evaluación y comparación de resultados entre escenarios sin intervención y con intervención	Mayo	13	Gráficos comparativos, informes técnicos	Determinación de la reducción del ruido lograda con las estrategias aplicadas.
3. Propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada	Socialización de los resultados y conclusiones finales	Mayo	14	Presentación audiovisual, informe final	Entrega final del diagnóstico, simulaciones y propuesta de diseño de infraestructura verde en fachada.

OBJETIVO 1	1- Análizar las condiciones acústicas actuales de los salones del 1º y 4º piso del bloque 10, que colindan con la avenida bolivariana en relación con el acondicionamiento acústico.
OBJETIVO 2	2- Evaluar el impacto de la vegetación en fachada según su densidad, forma, cantidad y distribución en el mejoramiento del acondicionamiento acústico.
OBJETIVO 3	3- Proponer un diseño de infraestructura verde en fachada que optimice el confort acústico en los salones, integrando la vegetación como un mecanismo efectivo para el acondicionamiento acústico.

Figura 19-Cronograma de trabajo-Autoría propia

Tabla 3- Cronograma – Plan de trabajo

7 Resultados

Herramienta 1: Desarrollo de una herramienta de encuesta con diversas preguntas para analizar el confort acústico en el estudio de caso, identificando las fuentes de ruido predominantes según la percepción de los usuarios

Objetivo: Identificar la percepción del ruido, sus fuentes y los puntos críticos dentro de los salones.

Preguntas:

1. Nombre
2. Tipos de usuarios
3. ¿Cómo calificarías el nivel de ruido dentro del salón durante la clase?
4. ¿Con qué frecuencia percibes ruido que interfiere con la clase?
5. ¿Consideras que el salón es acústicamente confortable?
6. ¿De dónde percibes que proviene principalmente el ruido?
7. ¿En qué momentos del día el ruido es más molesto?
8. ¿El ruido dificulta que escuches claramente al docente?
9. ¿Qué sensaciones o efectos te genera el ruido durante la clase?
10. ¿Sientes que el ruido afecta tu rendimiento académico?
11. ¿En qué parte del salón percibes mayor nivel de ruido?
12. ¿Crees que el ruido varía según la ubicación dentro del salón?
13. ¿Cómo percibes el comportamiento acústico de los materiales del salón?
14. ¿Consideras necesario mejorar el acondicionamiento acústico del salón mediante una capa vegetal?
15. Desde tu experiencia, ¿qué aspectos del salón deberían mejorar para reducir el ruido o mejorar el confort acústico?

Gráficos con resultados:

La recolección de datos se realizó con la participación de **64 personas**:



Figura 20- Los resultados se representan mediante gráficos circulares, que muestra la distribución porcentual de las respuestas obtenidas-Autoría propia

Conclusión

Los resultados de la encuesta de diagnóstico acústico del salón 314 (piso 3) evidencian que el espacio presenta condiciones acústicas poco favorables para el adecuado desarrollo de las actividades académicas. La percepción general de los usuarios indica que el ruido es un factor constante, con variaciones según la ubicación dentro del salón, lo que revela una distribución acústica desigual en el ambiente.

De acuerdo con las respuestas, se identifica que el principal origen del ruido proviene del exterior, específicamente del tráfico vehicular de la avenida Bolivariana, el cual ingresa de manera directa al salón. Esta afectación se percibe con mayor intensidad en el sector contiguo a las ventanas, convirtiéndose en la zona más crítica en términos de confort acústico.

Adicionalmente, los usuarios señalan que los materiales y condiciones actuales del salón no favorecen la absorción sonora, lo que contribuye a la propagación y amplificación del ruido en el interior del espacio. Esta situación repercute negativamente en la concentración, la comprensión de las clases y el rendimiento académico, especialmente durante periodos de mayor flujo vehicular.

Finalmente, la encuesta pone en evidencia la necesidad de implementar estrategias de acondicionamiento acústico, destacando soluciones pasivas como la fachada verde para optimizar las condiciones acústicas del espacio, así como mejoras en el diseño y los materiales del salón. En conjunto, la percepción de los usuarios valida la importancia de intervenir el espacio con criterios acústicos, justificando el desarrollo de modelos y propuestas al mejoramiento del confort acústico

15.Desde tu experiencia, ¿qué aspectos del salón crees que deberían mejorar para reducir el ruido o mejorar el confort acústico? (0 puntos)

27
Respuestas

Respuestas más recientes
"La fachada"
...

23 encuestados (85%) respondieron fachada para esta pregunta.

mejor diseño ruido exterior bloque sonido Fachada fachada vegetal bioclimática
ventanas fachada Mayor capa vegetal
La fachada **fachada** aberturas configuración espacial
anti ruidos acústica Todosalón aulas

Herramienta 2: Se utilizó el sonómetro como herramienta de medición técnica para evaluar las condiciones acústicas actuales del salón. Las mediciones se realizaron en tres momentos del día: en la mañana, en la tarde y en la noche, con el fin de identificar variaciones en los niveles de presión sonora según la actividad y el contexto exterior. Se tomaron registros en distintos puntos del espacio, permitiendo reconocer zonas con mayor incidencia de ruido y cambios en la percepción acústica. Este análisis de campo permitió comprender el comportamiento real del sonido dentro del aula y contrastarlo con los niveles recomendados para espacios educativos.



Figura 22-Localización bloque-Google earth



Figura 21-Imagen sonómetro-Autoría propia tomada en campo



Objetivo: Evaluar las condiciones acústicas actuales del salón mediante mediciones in situ, con el fin de determinar si los niveles de ruido afectan el confort y la calidad del ambiente de aprendizaje.

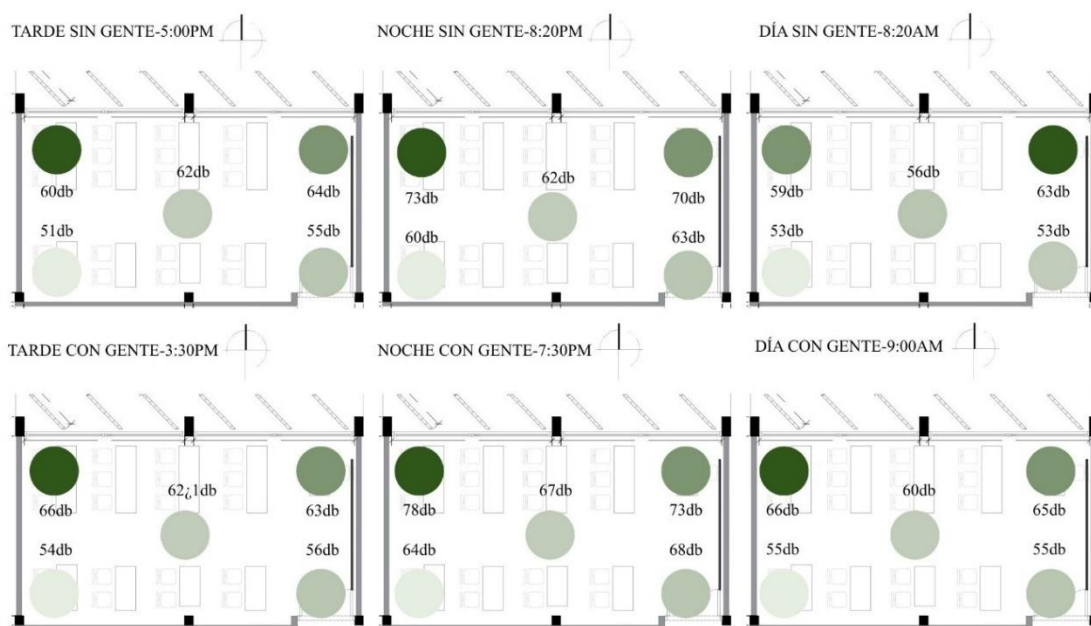


Figura 23-Plantas con análisis acústico-Autoría propia

Conclusiones específicas:

1. **Concentración mayor constante:** Guiándonos por el norte (ubicado hacia abajo), el punto situado hacia el **nor-occidente** del salón (esquina superior izquierda en el plano), representado con el **verde más oscuro**, presentó los niveles más altos de dB a lo largo del

día, tanto en mediciones con gente como sin gente. Esto indica una fuente de ruido constante asociada a ese sector.

2. **Punto de menor concentración sonora:** El punto más claro, ubicado hacia el **nor-orient** (esquina inferior izquierda del plano, considerando que el norte está abajo), registró los niveles más bajos de dB durante la mayoría de las mediciones. Esto evidencia una zona acústicamente más estable y con menor impacto sonoro.
3. **Variación con presencia de personas:** En todas las franjas horarias, los niveles aumentaron significativamente en condiciones “con gente”, especialmente en horario nocturno, donde se alcanzaron los picos más altos (hasta 78 dB), reforzando la incidencia de la actividad humana en el comportamiento acústico.
4. **Comportamiento intermedio estable:** El punto central del salón mantuvo valores relativamente constantes (entre 56 y 67 dB), lo que sugiere que el sonido se distribuye de manera homogénea en la zona media, sin concentraciones extremas.
5. **Incremento nocturno marcado:** Las mediciones nocturnas presentaron los valores más altos del día, especialmente en el punto nor-occidental, lo que podría relacionarse con menor absorción ambiental o mayor incidencia de ruido exterior en ese horario.

Conclusiones Generales:

Conclusión general 1 – Relación con ventanas

Se evidencia que la zona donde más se concentra el nivel de ruido corresponde al sector próximo a las ventanas, lo que sugiere que el principal ingreso de contaminación acústica proviene de la Av. Bolivariana y afecta directamente el perímetro del salón.

Conclusión general 2 – Coincidencia de patrones

A pesar de que las mediciones se realizaron en diferentes horas del día y en distintos días, los puntos de mayor y menor concentración de dB coincidieron reiteradamente en los mismos sectores. Esto demuestra que el comportamiento acústico del espacio mantiene un patrón constante y no es un fenómeno aleatorio.

Conclusión general 3 – Distribución perimetral del ruido

El comportamiento acústico demuestra que el ruido no se distribuye de manera uniforme, sino que tiende a concentrarse en el perímetro del espacio, mientras que la zona central mantiene niveles

más estables. Esto indica que los límites físicos del salón influyen directamente en la propagación y acumulación del sonido.

Conclusión general 4 – Influencia del contexto exterior

Los niveles registrados, incluso en ausencia de personas, superan los valores recomendados para espacios educativos, lo que sugiere que el salón está expuesto a una incidencia constante de ruido externo, proveniente de la Av. Bolivariana

Conclusión general 5 – Impacto en el confort acústico

Los valores obtenidos (alcanzando hasta 78 dB) evidencian que el espacio puede presentar condiciones acústicas desfavorables, afectando la concentración, la comunicación verbal y el desempeño en actividades académicas.

Conclusión general 6 – Necesidad de estrategias pasivas

El patrón repetitivo de concentración sonora en los mismos puntos indica que el problema no es eventual, sino estructural, lo que sugiere la necesidad de implementar estrategias pasivas de control acústico.

Herramienta 3: Como tercera herramienta metodológica, se realizó el levantamiento arquitectónico del salón 314 del Bloque 10, con el fin de obtener información precisa sobre sus dimensiones, proporciones y configuración espacial. Posteriormente, el espacio fue modelado digitalmente. Este proceso facilitó una comprensión integral del aula, no solo desde la observación en campo, sino también desde una lectura espacial y técnica que respalda el análisis ambiental desarrollado.

Objetivo: Levantar y modelar digitalmente el salón 314 del Bloque 10 para analizar sus condiciones espaciales, orientación y relación con factores ambientales que influyen en el comportamiento acústico y lumínico del espacio.

Ubicación del salón en el tercer piso:

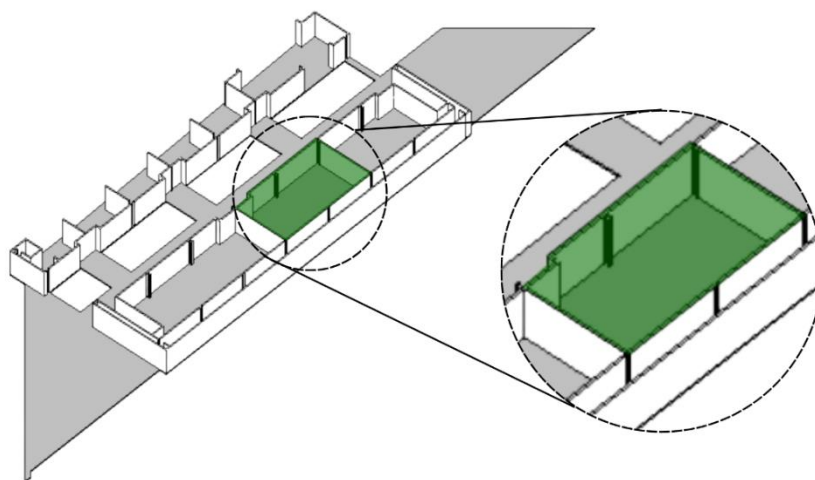
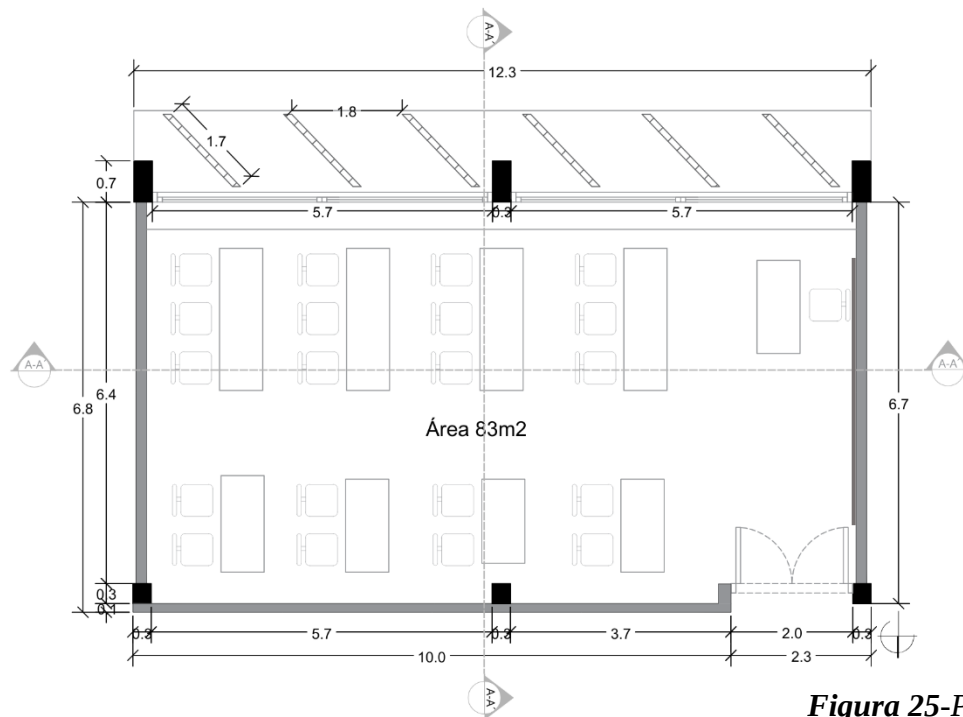


Figura 24-Isométrico Nivel 3 bloque arquitectura-Autoría propia

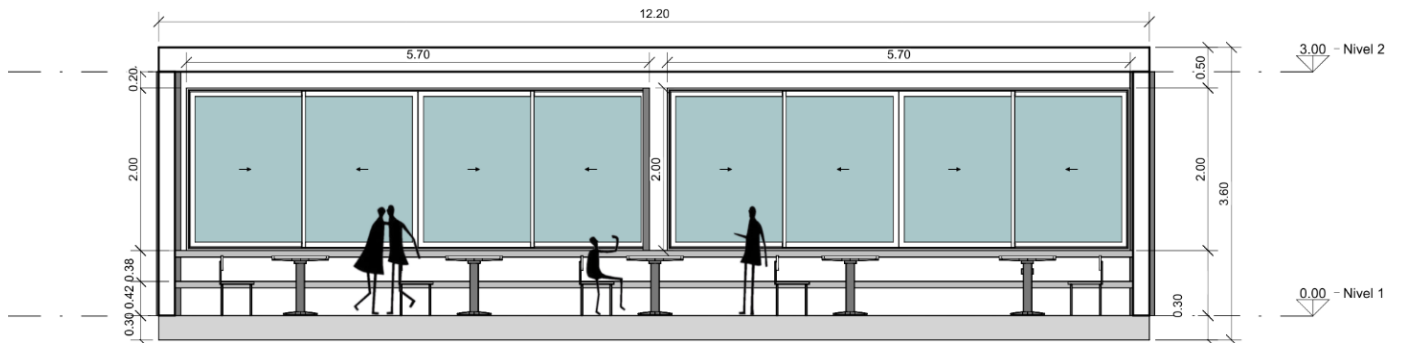
Planta Técnica:



Secciones

Figura 25-Planta-Autoría propia

Sección Longitudinal A-A'



Sección Transversal B-B'

Figura 26- Sección Longitudinal A-A'-Autoría propia

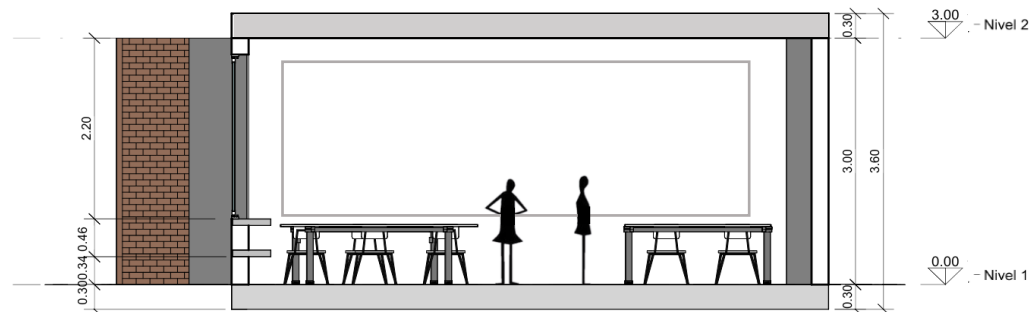


Figura 27-Sección Transversal B-B' -Autoría propia

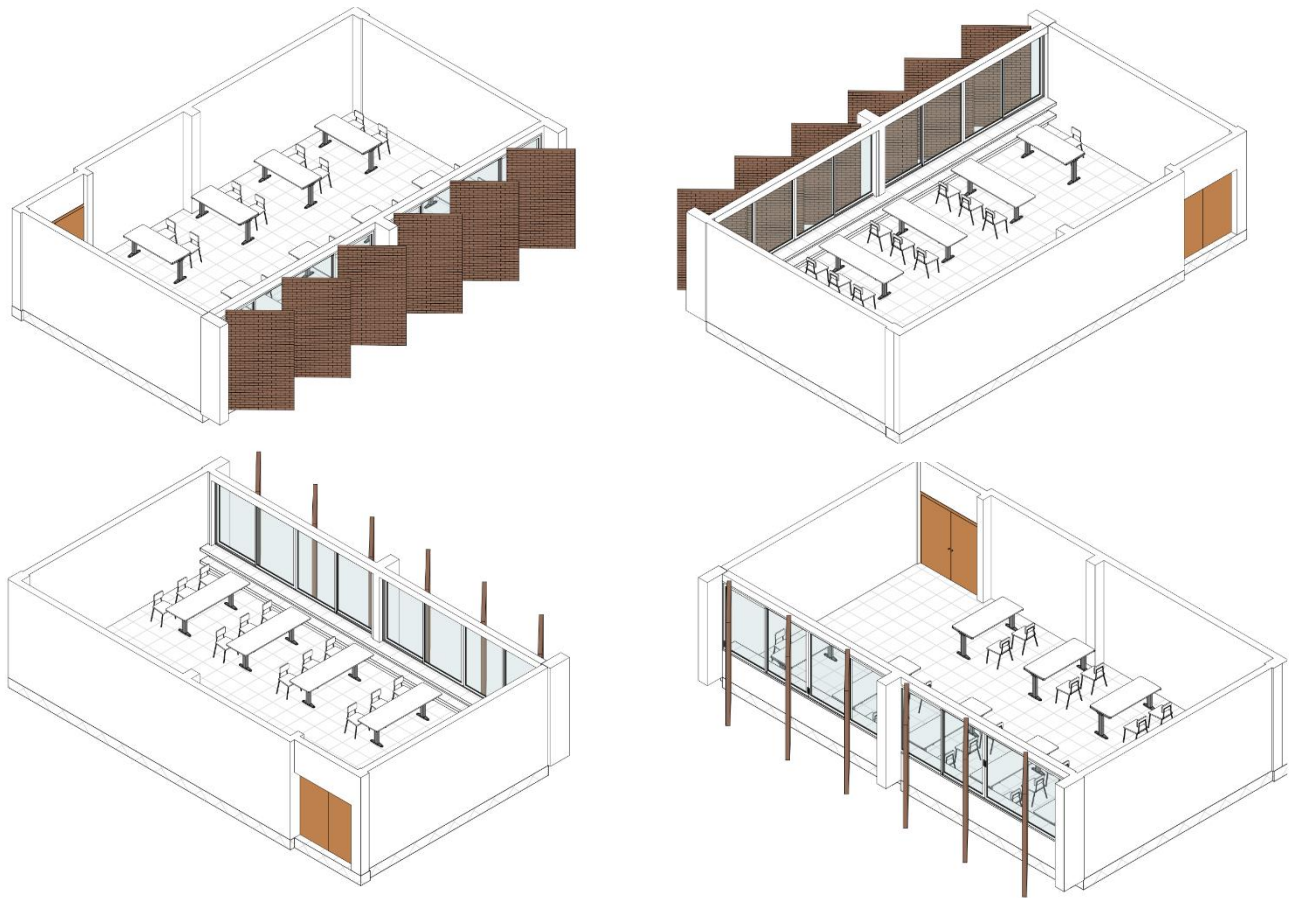


Figura 28-Isométricos-Autoría propia

Análisis de orientación, iluminación y vientos:

El esquema evidencia que la fachada principal del salón se encuentra orientada hacia el oriente, permitiendo la entrada de luz natural en las horas de la mañana. Esta condición favorece una iluminación más suave y homogénea durante el inicio de la jornada académica, reduciendo el sobrecalentamiento temprano del espacio.

El recorrido solar muestra que el sol nace por el **este**, alcanza su punto más alto al mediodía con un ángulo aproximado de incidencia elevado, y se oculta por el oeste, donde la radiación es más intensa y horizontal. Dado que la fachada con mayor proporción de vanos no está directamente expuesta al poniente, se reduce la ganancia térmica crítica de la tarde, lo cual resulta favorable en términos de confort térmico. En cuanto a la ventilación, el esquema indica la presencia de vientos predominantes que atraviesan la fachada acristalada, generando ventilación natural cruzada. Esta condición mejora la renovación del aire interior y contribuye a regular la temperatura, especialmente considerando el alto porcentaje de apertura (62% de vanos en fachada). En términos generales, la orientación del salón favorece la iluminación natural controlada y la ventilación pasiva, optimizando el desempeño ambiental del espacio.

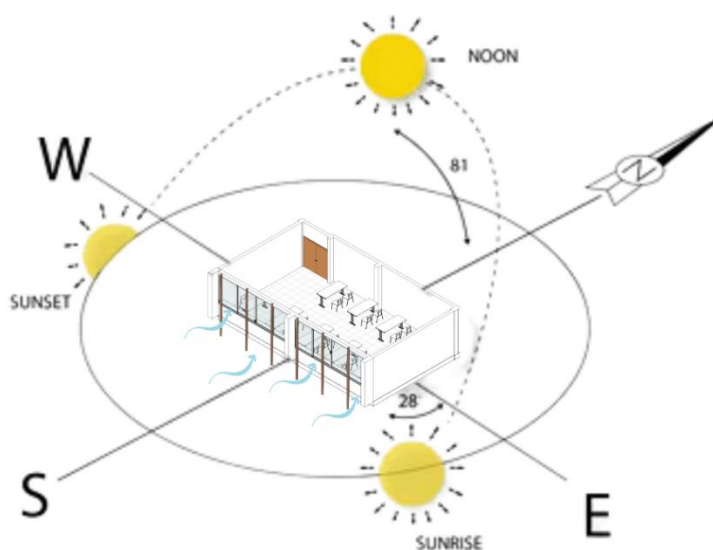


Figura 29-Análisis bioclimático-Autoría propia

Posterior al levantamiento arquitectónico del salón, se desarrolló un análisis de áreas que permitió evaluar la organización espacial, la ocupación del espacio, las dimensiones funcionales y la eficiencia en la distribución.

- **Análisis de proporción de vanos en fachada:**

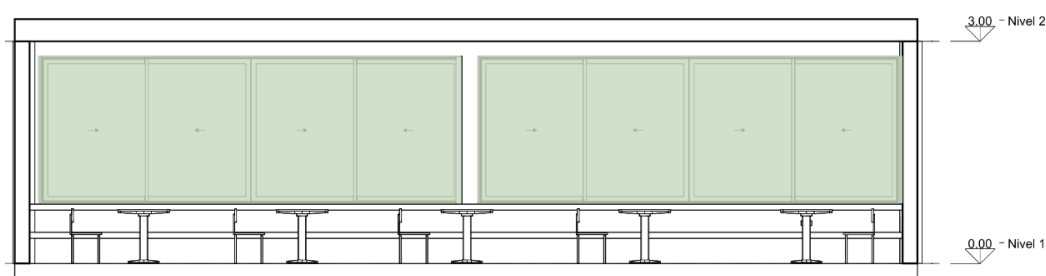


Figura 30-Vanos en fachada-Autoría propia

Cálculo de áreas:

Concepto	Operación	Resultado
Área de una ventana	5.70 m × 2.00 m	11.40 m ²
Área total de ventanas (2 módulos)	11.40 m ² × 2	22.80 m ²
Área total de fachada	12.20 m × 3.00 m	36.60 m ²
Porcentaje de ocupación de vanos	$(22.80 \div 36.60) \times 100$	62.29 %

Tabla 4-Calculo de áreas-Autoría propia

Conclusión técnica: Las ventanas ocupan aproximadamente el 62% del área total de la fachada, lo que evidencia una alta proporción de vanos respecto al plano macizo, favoreciendo la iluminación natural, ventilación cruzada y relación interior–exterior del espacio.

Sin embargo, en este caso específico, dicha condición no resulta totalmente favorable, ya que la elevada permeabilidad de la fachada facilita la transmisión de ruido exterior hacia el interior, afectando el confort acústico y las condiciones adecuadas para actividades de investigación y concentración académica.

- **Análisis de área del piso**

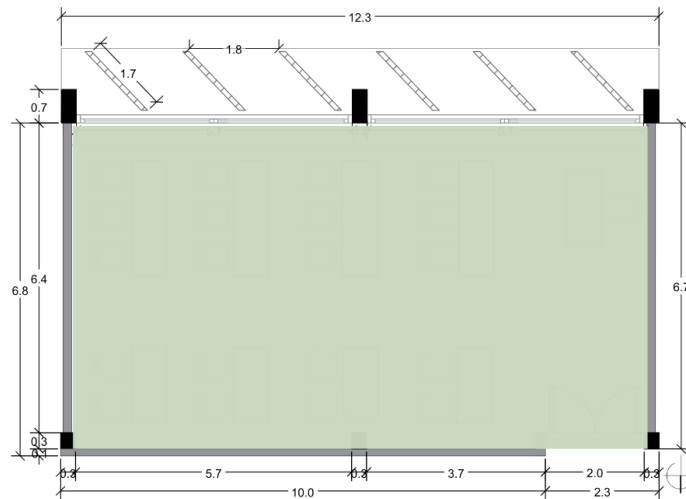


Figura 31-*Planta área-Autoría propia*

Conclusión técnica: El salón cuenta con un área total de 83 m², lo que en términos cuantitativos representa una superficie amplia para el desarrollo de actividades académicas.

- **Análisis de ocupación del mobiliario (área – salón)**



Figura 32-*Planta mobiliario-Autoría propia*

Cálculo de huella física del mobiliario:

Elemento	Cantidad	Área unitaria (m ²)	Área total (m ²)
Mesas de trabajo	8	1.26	10.08
Sillas	16	0.20	3.24
Escritorio docente	1	1.05	1.05
Total huella física	—	—	14.37 m ²
Porcentaje real en planta	—	—	17.31 %

Tabla 5- *Calculo huellas-Autoría propia*

Cálculo de área funcional real por usuario:

Concepto	Cálculo	Resultado
Número de estudiantes	—	16
Área recomendada por estudiante	—	2.20 m ²
Área funcional total	16×2.20	35.20 m ²
Porcentaje respecto al salón	$(35.20 \div 83) \times 100$	42.40 %

Tabla 6- *Tabla área funcional-Autoría propia*

Conclusión técnica: Aunque la huella física del mobiliario ocupa únicamente el 17% del área total, al considerar el espacio funcional necesario por usuario, la ocupación real se aproxima al 42% del salón.

La ocupación real no solo contempla el área que físicamente cubren mesas y sillas, sino también el espacio indispensable para su uso adecuado, incluyendo zonas de movimiento, retiro de sillas, circulación inmediata y confort corporal. Es decir, representa el área efectiva que el mobiliario demanda para funcionar correctamente dentro del espacio.

Posible área de intervención con vegetación:

- **Intervención en fachada con vegetación:** En la fachada se propone la incorporación de un sistema de vegetación vertical continua a lo largo del frente acristalado. Esta estrategia aportaría al confort ambiental del espacio y contribuiría al acondicionamiento acústico del salón, generando una envolvente más eficiente frente a las condiciones exteriores. La capa vegetal funcionaría como filtro natural, mejorando la calidad espacial, regulando la incidencia solar y favoreciendo un ambiente interior más confortable y equilibrado.



Figura 33-Isométrico 1-Autoría propia

- **Intervención con vegetación en muros interiores:** En el interior, se plantea la incorporación puntual de vegetación en aquellos muros y zonas donde, según el análisis realizado con sonómetro, se registraron niveles más elevados, específicamente en el punto ubicado hacia el nor-occidente del salón. Esta intervención permitiría reforzar el acondicionamiento acústico en las áreas críticas identificadas, ayudando a equilibrar la distribución sonora dentro del espacio. La vegetación actuaría como superficie complementaria de absorción, mejorando el confort sin saturar visualmente el ambiente.



Figura 34- Isométrico 1-Autoría propia

Herramienta 4: Se desarrolló una herramienta de análisis basada en la construcción de tablas comparativas por escenarios, con el fin de evaluar el impacto de diferentes sistemas de muros verdes en el comportamiento acústico del espacio. La herramienta consiste en la definición de múltiples escenarios de intervención (muros 1, 2 y 3 de manera individual y combinada), en los cuales se incorporan distintos tipos de sistemas vegetales, como paneles modulares y sistemas de filtro con bolsillos, junto con combinaciones específicas de especies vegetales adaptadas al contexto.

Para cada escenario, se calcularon las áreas de intervención, la cantidad de módulos o unidades necesarias, y se asignaron coeficientes de absorción acústica (Hz) tanto para la vegetación como para el sistema soporte. Estos valores fueron organizados en tablas que permiten comparar el comportamiento del sonido en diferentes frecuencias (125 Hz – 4000 Hz). A partir de esta información, se estimó el Tiempo de Reverberación Promedio (TR) del espacio en cada escenario, entendiendo cómo la incorporación de vegetación modifica la absorción sonora y reduce la persistencia del sonido dentro del aula. Esta herramienta permite no solo cuantificar el impacto acústico, sino también relacionar variables arquitectónicas, materiales y biológicas, facilitando la toma de decisiones sobre qué sistema, ubicación y combinación vegetal resulta más eficiente.

Objetivo: Evaluar y comparar el comportamiento acústico del espacio a partir de diferentes escenarios de intervención con muros verdes, mediante el análisis de coeficientes de absorción y el cálculo del Tiempo de Reverberación Promedio (TR), con el fin de determinar la combinación más eficiente de sistema constructivo y especies vegetales para mejorar el acondicionamiento acústico del aula.

Pasos realizados:

1. Ajuste del levantamiento – complemento de la herramienta anterior:

En este paso se realizó un ajuste y depuración del cálculo de áreas, a partir de la información obtenida en la herramienta anterior. Inicialmente, el análisis consideraba el espacio de manera general; sin embargo, no se habían diferenciado completamente algunos elementos clave que influyen directamente en el comportamiento acústico.

Por esta razón, se profundizó en el levantamiento, incorporando los espacios y superficies que no habían sido calculados con precisión, como:

- Diferenciación entre ventanas (vanos) y muros macizos
- Separación del muro con puerta, identificando el área efectiva real
- Análisis del muro con tablero, considerando la superficie ocupada y la superficie libre
- Inclusión de elementos como paneles de ladrillo en fachada

Este proceso permitió refinar la información, pasando de un cálculo general a uno más detallado y específico, donde cada componente del espacio se entiende de forma independiente. En particular, la relación entre ventana–muro y puerta–muro fue fundamental, ya que estos elementos modifican significativamente la cantidad de superficie reflectante disponible, afectando directamente la absorción y la reverberación del sonido.

Tabla 1: Fachada (Muro 1-Ventana)

Tabla 1-Fachada-Autoría propia

Elemento	Cálculo	Área (m ²)	%
Fachada total	12.20×3.00	36.60	100%
Ventanas (vanos)	$(5.70 \times 2.00) \times 2$	22.80	62.29%
Muro (macizo)	$36.60 - 22.80$	13.80	37.71%

Tabla 2: Muro 2 – Con puerta

Tabla 7-Muro 2-Autoría propia

Elemento	Cálculo	Área (m ²)	%
Muro total	11.40×3.00	34.20	100%
Puerta (vano)	2.00×2.00	4.00	11.70%
Muro (macizo)	$34.20 - 4.00$	30.20	88.30%

Tabla 3: Muro 3 – Con Tablero

Tabla 8-Muro 3-Autoría propia

Elemento	Cálculo	Área (m ²)	%
Muro total	3.00×6.32	$18.96 \approx 19.00$	100%
Tablero	2.40×1.20	2.88	15.16%
Muro libre	$19.00 - 2.88$	16.12	84.84%

- **Tabla 4: Paneles de ladrillo**

Tabla 9-Paneles ladrillos-Autoría propia

Elemento	Cantidad	Medidas	Área unitaria (m ²)	Área total (m ²)
Panel de ladrillo	1	0.70 × 3.30	2.31	—
Total paneles	6	0.70 × 3.30	2.31	13.86

2. Investigación sobre especies vegetales y su capacidad de absorción acústica:

Posteriormente, se realizó una investigación sobre especies vegetales y su capacidad de absorción acústica, con el objetivo de identificar aquellas que pudieran contribuir al mejoramiento del confort dentro del espacio.

Durante esta etapa, se revisaron diferentes fuentes y estudios relacionados con muros verdes, vegetación y absorción del sonido en distintas frecuencias (Hz). Sin embargo, se evidenció que no existe una tabla unificada que relacione directamente especies específicas con coeficientes de absorción acústica completos, por lo que fue necesario trabajar a partir de información dispersa.

A partir de estas investigaciones, se recopilaron las especies más mencionadas en estudios de jardines verticales y sistemas vegetales, identificando sus comportamientos acústicos aproximados según su densidad, tipo de hoja y configuración (masa vegetal, porosidad y retención de aire).

Posteriormente, se realizó una depuración más rigurosa de las especies, seleccionando únicamente aquellas que son aptas para el contexto climático de Medellín, considerando

factores como:

- -Adaptabilidad a clima tropical húmedo
- -Comportamiento en interiores y exteriores
- -Requerimientos de luz y mantenimiento
- -Capacidad de crecimiento en sistemas verticales

Este proceso permitió definir un catálogo de especies viables, que no solo responden a criterios acústicos, sino también a condiciones reales de implementación, asegurando la coherencia entre el análisis técnico y la propuesta arquitectónica.

Tabla 10- Tabla 1: Fuentes y referentes utilizados para la obtención de la información- Autoría propia

Fuentes y referentes utilizados para la obtención de la información

Título del artículo	Referencia APA 7
ACOUSTIC EVALUATION OF A NEW MODULAR SYSTEM FOR GREEN ROOFS AND GREEN WALLS	Manso, M., Castro-Gomes, J. P., Marchacz, M., Górski, M., Dulak, L., & Żuchowski, R. (2017). Acoustic evaluation of a new modular system for green roofs and green walls. <i>Architecture, Civil Engineering, Environment</i> , 10(2).
ABSORCIÓN ACÚSTICA DE UNA FACHADA VEGETAL MEDIANTE UNA PISTOLA DE IMPEDANCIA	Navacerrada, M. A., Oquendo-Di Cosola, V., Ruiz Garcia, L., & Olivieri, F. (2024). Absorción acústica de una fachada vegetal mediante una pistola de impedancia. En XIII Congreso Ibérico de Acústica / TECNIAACÚSTICA 2024.
Evaluación de muros verdes como sistema de aislamiento acústico pasivo para edificios	Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., Álvaro, J. E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluación de muros verdes como sistema de aislamiento acústico pasivo para edificios. <i>Applied Acoustics</i> , 89, 46–56. https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010
Propiedades de absorción acústica de las fibras naturales: una revisión	Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Petrů, M., Noman, M. T., Mishra, R., & Militký, J. (2020). Propiedades de absorción acústica de las fibras naturales: una revisión. <i>Sustainability</i> , 12(20), 8477. https://doi.org/10.3390/su12208477
Absorción Acústica de Jardines Verticales	Velis, A., Posse, C., & Rizzo La Malfa, A. (2019). Absorción acústica de jardines verticales. <i>Revista Elektron</i> , 3(1), 10–15.

Tabla 11- Tabla 2: Vegetación general- Autoría propia

Vegetación general

Material / Especie vegetal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Fuente
Helechos (Nephrolepis exaltata)	0,1	0,25	0,45	0,6	0,7	0,75	Velis et al. (2019); Manso et al. (2017)
Hiedra (Hedera helix)	0,12	0,28	0,48	0,62	0,72	0,78	Manso et al. (2017); Azkorra et al. (2015)
Pothos (Epipremnum aureum)	0,15	0,3	0,5	0,65	0,75	0,8	Velis et al. (2019); Yang et al. (2020)
Gramíneas (pastos ornamentales)	0,1	0,25	0,5	0,68	0,8	0,85	Yang et al. (2020); Azkorra et al. (2015)
Sedum (Sedum spp.)	0,2	0,4	0,6	0,75	0,8	0,85	Manso et al. (2017)
Musgos (moss wall)	0,25	0,45	0,65	0,8	0,85	0,9	Yang et al. (2020); Velis et al. (2019)
Tapizantes (Ficus pumila)	0,12	0,27	0,47	0,63	0,73	0,78	Azkorra et al. (2015); Manso et al. (2017)
Arbustivas (Philodendron)	0,15	0,32	0,52	0,68	0,78	0,82	Velis et al. (2019); Navacerrada et al. (2024)
Hoja grande (Monstera deliciosa)	0,14	0,3	0,5	0,66	0,76	0,8	Velis et al. (2019); Yang et al. (2020)
Mezcla vegetal densa	0,18	0,35	0,55	0,7	0,8	0,85	Navacerrada et al. (2024); Manso et al. (2017)

Tabla 12- Tabla 3: Vegetación depurada para el contexto de Medellín- Autoría propia

Vegetación depurada para el contexto de Medellín

Especie vegetal	Imagen	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Adaptación a humedad alta	Desempeño en muros verdes	Densidad foliar	Justificación
<i>Nephrolepis exaltata</i> (Helecho)		0,15	0,3	0,55	0,7	0,8	0,85	Alta	Alta	Alta	Ideal en climas húmedos, frondoso
<i>Epipremnum aureum</i> (Pothos)		0,12	0,28	0,5	0,65	0,75	0,8	Alta	Alta	Media	Muy resistente y adaptable
<i>Ficus pumila</i>		0,14	0,3	0,55	0,7	0,8	0,85	Alta	Alta	Alta	Cobertura densa en fachadas
<i>Philodendron scandens</i>		0,13	0,29	0,52	0,68	0,78	0,82	Alta	Alta	Media	Adaptación tropical excelente
<i>Spathiphyllum wallisii</i>		0,16	0,32	0,58	0,72	0,82	0,88	Alta	Media	Media	Funciona mejor en interior
Musgo (Moss)		0,2	0,4	0,65	0,8	0,9	0,95	Muy alta	Alta	Alta	Máxima absorción, requiere humedad constante

La selección de especies vegetales para el sistema de muros verdes se realizó considerando tanto su capacidad de absorción acústica como su adaptabilidad al clima tropical húmedo de Medellín. No todas las plantas funcionan igual en interior y exterior, por lo que se diferenciaron según las condiciones de luz, humedad y ventilación de cada superficie.

En las zonas de fachada (muros con ventana), donde existe mayor exposición a la radiación solar y ventilación, se priorizaron especies resistentes y de crecimiento denso como *Pothos* (*Epipremnum aureum*), *Ficus pumila* y *Philodendron*. Estas plantas presentan buena cobertura superficial, toleran condiciones variables y contribuyen a la absorción acústica gracias a su volumen foliar.

En los muros interiores, donde predominan condiciones de sombra y humedad controlada, se seleccionaron especies propias de ambientes interiores como *Helecho* (*Nephrolepis exaltata*), *Spathiphyllum* y *Calathea*. Estas plantas poseen hojas más blandas y densas, lo

que mejora el comportamiento acústico al aumentar la absorción en frecuencias medias y altas, además de adaptarse mejor a espacios cerrados.

La combinación estratégica de especies permite generar sistemas vegetales más eficientes, donde la densidad, textura y disposición de las hojas influyen directamente en el desempeño acústico. Así, los muros interiores presentan mayor absorción global, mientras que la fachada aporta un equilibrio entre resistencia ambiental y desempeño acústico.

3. Selección de sistemas vegetales a partir de referentes específicos:

Posteriormente, se realizó una revisión de estudios especializados sobre absorción acústica en muros verdes, con el fin de identificar sistemas constructivos con respaldo técnico y datos medibles en diferentes frecuencias.

Tabla 13-Sistemas vegetales-Autoría propia

Sistema / Especie vegetal	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	Fuente / Observación
Jardín vertical (mezcla herbáceas + sustrato)	0,1	0,25	0,45	0,6	0,7	0,75	Velis et al. (2019)
Muro verde modular (plantas + sustrato)	0,15	0,3	0,5	0,65	0,75	0,8	Manso et al. (2017)
Fachada vegetal (medición in situ)	0,12	0,28	0,48	0,62	0,72	0,78	Navacerrada et al. (2024)
Muro verde (sistema continuo)	0,1	0,25	0,5	0,68	0,8	0,85	Azkorra et al. (2015)
Fibras naturales (base vegetal – referencia material)	0,2	0,4	0,6	0,75	0,8	0,85	Yang et al. (2020)

A partir de este análisis, se seleccionaron dos referentes principales:

- El sistema de **paneles modulares** fue tomado del estudio “*Evaluación de muros verdes como sistema de aislamiento acústico pasivo para edificios*” desarrollado por Z. Azkorra, G. Pérez, J. Coma, L.F. Cabeza, S. Bures, J.E. Álvaro, A. Erkoreka y M. Urrestarazu, en el cual se analizan muros verdes estructurados con sustrato y vegetación, evidenciando su comportamiento como sistema pasivo de absorción acústica
- El sistema de **filtro con bolsillos (jardín vertical flexible)** se tomó del estudio “*Absorción Acústica de Jardines Verticales*” de Ariel Velis, Carlos Posse y Ana Rizzo La Malfa, donde se evalúan sistemas vegetales continuos y ligeros, destacando su capacidad de absorción gracias a la combinación de material textil, aire y vegetación.

A partir de estos dos estudios, se extrajeron los coeficientes de absorción acústica en distintas frecuencias (Hz), los cuales fueron utilizados como base para la construcción de las tablas del proyecto.

La elección de estos dos sistemas responde a que representan dos tipologías claramente diferenciadas:

- Un sistema modular, más denso y estructurado
- Un sistema flexible, más poroso y ligero

Esto permite establecer una comparación directa sobre cómo cada tipo de soporte influye en la absorción sonora y en la reducción del Tiempo de Reverberación (TR) dentro del espacio.

Tabla comparativa de ambos sistemas:

Tabla 14-Comparativa sistemas vegetales- Autoría propia

Sistema	Referente	Composición del sistema	Dimensiones / espesor	Cámara de aire	Características constructivas	Cualidades acústicas	Observaciones clave
Panel modular (rígido)	Azkorra et al.	Paneles modulares + sustrato + vegetación + estructura	≈10–12 m ² / espesor 5–12 cm	Sí (5–12 cm)	Paneles prefabricados con sustrato integrado	Buena absorción en medias y altas frecuencias	Sistema estable, absorción homogénea
Filtro con bolsillos	Velis et al.	Estructura + soporte + doble filtro + bolsillos	3–5 cm	Sí	Sistema textil con cavidades	Alta absorción por porosidad	Sistema ligero y más permeable

El dimensionamiento de los sistemas vegetales se realizó a partir del área total del muro a intervenir y las dimensiones estándar de cada sistema constructivo. En el caso del sistema modular, cada unidad de cultivo tiene un área aproximada de 10,08 m² (3,6 m × 2,8 m). Para un muro de 30 m², se divide el área total entre el área de cada módulo, obteniendo un valor cercano a 3 unidades. Este resultado se redondea al número entero más cercano que garantice cobertura suficiente, por lo que se requieren 3 módulos para cubrir la superficie.

Por otro lado, en el sistema de *filtro con bolsillos*, cada unidad o bolsillo se considera como una célula de plantación que cubre aproximadamente 1 m². Para un área de 30 m², el cálculo da un total cercano a 30 bolsillos; sin embargo, se realiza un *redondeo hacia arriba (31 unidades)* para asegurar la cobertura completa del muro y evitar vacíos en el sistema vegetal. Este criterio de redondeo es fundamental en el diseño, ya que garantiza continuidad en la superficie vegetal y un mejor desempeño tanto *acústico como espacial*.

Tabla 15-Cálculos sistemas vegetales- Autoría propia

Sistema	Área del muro (m ²)	Unidad del sistema	Área por unidad (m ²)	Cálculo	Resultado	Ajuste	Total final
Modular (paneles)	30	Módulo vegetal	10.08	30 ÷ 10.08	2.97	Redondeo	3 módulos
Filtro (bolsillos)	30	Bolsillo vegetal	1.00	30 ÷ 1.00	30	Redondeo superior	31 bolsillos

Notas:

- El sistema filtro + bolsas absorbe más (más poroso)
- El sistema modular es más constructivo y estable
- Interior > mejor absorción que fachada

4. Diagnóstico y construcción de escenarios

a. Diagnóstico y construcción de escenarios:

En primer lugar, se realizó un diagnóstico acústico del salón, analizando los materiales existentes en cada una de las superficies (muros, ventanas, puerta, tablero y demás elementos). A cada material se le asignaron sus respectivos coeficientes de absorción acústica en diferentes frecuencias (Hz), lo que permitió caracterizar el comportamiento sonoro del espacio en su estado actual.

A partir de esta información, se calculó el Tiempo de Reverberación (TR) inicial, utilizando la fórmula de Sabine, estableciendo así una línea base para el análisis comparativo.

Volumen:

Parámetro	Valor	Unidad
Largo	12.3	m
Ancho	6.7	m
Área	83	m ²
Altura	3	m
Volumen	249	m ³

Tabla 16-Volumen- Autoría propia

Este diagnóstico permitió:

- Identificar las superficies predominantes (reflectantes vs. absorbentes)
- Detectar posibles problemas de reverberación
- Establecer un punto de partida cuantificable

Materiales	Superficie 1- MURO 1	Superficie 1- VENTANA	Superficie 2- PUERTA	Superficie 2- MURO 2	Superficie 3- MURO 3	Superficie 4- MURO 4	Superficie 4- Tablero	Paneles ladrillo fachada	Techo	Piso	Total
Área del material (Superficie)	13,80	22,80	4,2	30,0	19,0	16,12	2,88	13,86	85,0	85,0	219,0
Coeficientes de absorción	125 Hz	0,01	0,18	0,09	0,01	0,01	0,01	0,05	0,02	0,01	0,04
	250 Hz	0,01	0,06	0,11	0,01	0,01	0,01	0,06	0,02	0,01	0,03
	500 Hz	0,02	0,04	0,10	0,02	0,02	0,02	0,08	0,03	0,01	0,04
	1000 Hz	0,05	0,03	0,11	0,05	0,05	0,05	0,10	0,04	0,02	0,05
	2000 Hz	0,07	0,02	0,09	0,07	0,07	0,07	0,10	0,05	0,02	0,06
	4000 Hz	0,03	0,02	0,06	0,03	0,03	0,03	0,10	0,02	0,02	0,04

Se inserta el coeficiente de absorción del material en cada una de las frecuencias.

Producto (área x coeficiente)	Total 125	0,0	0,2	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0	0,9	2,6
	Total 250	0,0	0,1	0,1	0,3	0,2	0,0	0,1	0,0	0,9	2,5
	Total 500	0,0	0,0	0,1	0,6	0,4	0,0	0,1	0,0	0,9	3,0
	Total 1000	0,1	0,0	0,1	1,5	1,0	0,1	0,1	0,0	1,7	6,2
	Total 2000	0,1	0,0	0,1	2,1	1,3	0,1	0,1	1,7	1,7	7,2
	Total 4000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Volumen del espacio (m3)	249
--------------------------	-----

	Tiempo de Reverberación	Tiempo de Reverberación Promedio
Total 125	15,82	9,60
Total 250	16,30	
Total 500	13,50	
Total 1000	6,43	
Total 2000	5,55	
Total 4000	0,00	

Tabla 17-Diagnóstico inicial- Autoría propia

b. Diagnóstico y construcción de escenarios:

Posteriormente, se realizó la simulación de intervención, en la cual se incorporaron sistemas de vegetación sobre los muros seleccionados.

Para ello:

- Se mantuvieron las condiciones originales del salón
- Se modificaron únicamente las superficies intervenidas
- Se asignaron nuevos coeficientes de absorción correspondientes a los sistemas vegetales.

Esto permitió evaluar el impacto directo de la vegetación sobre el comportamiento acústico del espacio.

c. Construcción de escenarios

Como parte del proceso, se desarrollaron un total de 8 escenarios de intervención, organizados de la siguiente manera:

- 4 escenarios con sistema modular (panel rígido)**
- 4 escenarios con sistema de filtro con bolsillos**

Cada escenario corresponde a distintas combinaciones de muros intervenidos (muro 1, muro 2, muro 3 y sus combinaciones), generando variaciones en la cantidad y disposición de superficie vegetal.

Figura 36-2do escenario-Autoría propia

- 3er escenario con sistema modular (panel rígido)

A 3D architectural rendering of a rooftop terrace. The terrace is enclosed by a low wall on three sides, with a double wooden door at the bottom center. The back wall is a lush green wall with various plants and flowers. The terrace floor is paved with light-colored tiles. There are four long white rectangular tables arranged in a row, each with four black chairs. The roof is flat and white, with several small, dark, triangular structures along the edge.

Tabla 20-3er *escenario panel rígido-Autoría propia*

Figura 37-3er escenario-Autoría propia

- 4to escenario con sistema modular (panel rígido)

A 3D architectural rendering of a modern office interior. The room features a large whiteboard on the left wall, a wooden door at the back, and a large green wall on the right. The floor is light-colored, and there are several desks and chairs arranged in the center. The room is enclosed by a glass and metal railing on the left side.

Tabla 21-4to escenario panel rígido-Autoría propia

Figura 38-4to escenario-Autoría propia

Escenarios con filtro con bolsillos:

1er escenario con filtro con bolsillos:

Cálculos para modificar Añadir información														
Superficie intervenida														
Materiales	Superficie 1- MURTO 1	Superficie 2- VEGETACIÓN	Superficie 3- SOPORTE FLEXIBLES	Superficie 4- VENTANA	Superficie 5- PUERTA	Superficie 6- MURTO 2	Superficie 7- MURTO 3	Superficie 8- MURTO 4	Superficie 9- 4-Tablero	Paneles Isótopo fachada	Techo	Piso	Total	
Área del material (Superficie)	11.80	22.80	22.80	22.80	4.2	30.0	19.0	16.12	2.88	11.86	85.0	85.0	257.0	
Coeficientes de absorción	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
Puntos + Fines + Planchados														
Cantidad de Bolsas= 24														
Se muestra el coeficiente de absorción del material en cada una de las superficies														
Producto (área x coeficiente)	Total 125	0.0	0.2	0.1	0.2	0.1	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	2.8
	Total 250	0.0	0.4	0.1	0.1	0.1	0.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	2.8
	Total 500	0.0	0.8	0.2	0.2	0.2	0.6	0.4	0.0	0.2	0.0	0.9	0.9	2.8
	Total 1000	0.1	0.7	0.5	0.0	0.1	1.5	1.0	0.1	0.1	0.0	1.7	1.7	2.4
	Total 2000	0.1	0.9	0.8	0.0	0.1	2.1	1.3	0.1	0.1	0.1	1.7	1.7	2.6
	Total 4000	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Tiempo de florecimiento														
Tiempo de florecimiento Promedio														
Total 125														
Total 250														
Total 500														
Total 1000														
Total 2000														
Total 4000														

Volumen del espacio (m3)	243	Total 125	14.30
		Total 250	13.88
		Total 500	16.36
		Total 1000	6.42
		Total 2000	4.67
		Total 4000	0.08

Tiempo de florecimiento	R.11	Total 125	14.30
		Total 250	13.88
		Total 500	16.36
		Total 1000	6.42
		Total 2000	4.67
		Total 4000	0.08

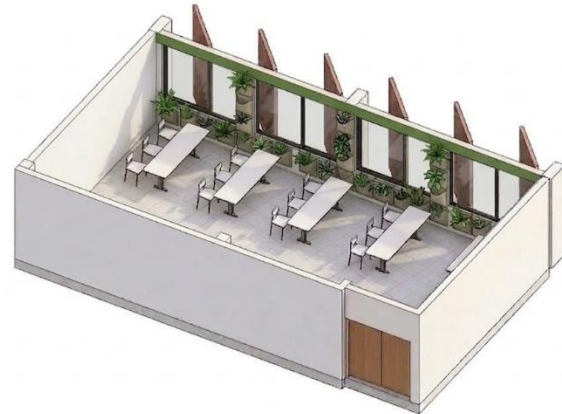


Tabla 22-1er escenario bolsillos-Autoría propia

Figura 39-1er escenario-Autoría propia

2do escenario con filtro con bolsillos:

Cálculos para modificar Añadir información														
Superficie intervenida														
Materiales	Superficie 1- MURTO 1	Superficie 2- VENTANA	Superficie 3- PUERTA	Superficie 4- MURTO 2	Superficie 5- SOPORTE FLEXIBLES	Superficie 6- VEGETACIÓN	Superficie 7- MURTO 3	Superficie 8- MURTO 4	Superficie 9- 4-Tablero	Paneles todos fachada	Techo	Piso	Total	
Área del material (Superficie)	11.80	22.80	4.2	30.0	19.0	19.0	16.12	2.88	11.86	85.0	85.0	85.0	257.0	
Coeficientes de absorción	0.01%	0.01	0.08	0.09	0.01	0.05	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.01	0.05	
	250 kg	0.01	0.05	0.11	0.01	0.12	0.01	0.01	0.08	0.02	0.01	0.01	0.08	
	500 kg	0.02	0.04	0.16	0.02	0.24	0.02	0.02	0.08	0.03	0.01	0.01	0.10	
	1000 kg	0.05	0.03	0.11	0.05	0.40	0.06	0.05	0.10	0.04	0.02	0.02	0.14	
	2000 kg	0.07	0.02	0.08	0.07	0.59	0.09	0.07	0.11	0.06	0.02	0.02	0.19	
4000 kg	0.03	0.02	0.09	0.03	0.80	0.06	0.03	0.10	0.07	0.02	0.02	0.32		
Bolsas + Cantidad de Bolsas= 20														
Planchados + Fines														
Se muestra el coeficiente de absorción del material en cada una de las superficies														
Producto (Área x coeficiente)	Total 125	0.0	0.2	0.1	0.3	1.0	3.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	6.7
	Total 250	0.0	0.1	0.1	0.3	2.3	6.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	10.0
	Total 500	0.0	0.0	0.1	0.6	1.7	10.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	16.7
	Total 1000	0.1	0.0	0.1	1.5	8.8	15.3	1.0	0.1	0.1	0.0	1.7	1.7	26.1
	Total 2000	0.1	0.0	0.1	2.1	10.5	19.0	1.3	0.1	0.1	0.1	1.7	1.7	36.7
	Total 4000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2
Tiempo de florecimiento														
Tiempo de florecimiento Promedio														
Total 125														
Total 250														
Total 500														
Total 1000														
Total 2000														
Total 4000														

Volumen del espacio (m3)	243

Total 125	9.39
Total 250	2.84
Total 500	2.88
Total 1000	1.83
Total 2000	1.90
Total 4000	0.80

Tiempo de florecimiento	Tiempo de florecimiento Promedio

Total 125	9.39
Total 250	2.84
Total 500	2.88
Total 1000	1.83
Total 2000	1.90
Total 4000	0.80

2.37



Tabla 23-2do escenario panel rígido-Autoría propia

Figura 40-2do escenario-Autoría propia

■ 3er escenario con filtro con bolsillos:

Celdas para modificar | Añadir información

Superficie intervenida

Materiales	Superficie 1-MURO 1	Superficie 1-VEGETACIÓN	Superficie 2-SOPORTE FILTROS	Superficie 2-MURO 2	Superficie 2-SOPORTE FILTROS	Superficie 3-VEGETACIÓN	Superficie 3-MURO 3	Superficie 4-Muro	Superficie 4-Muro	Panuelos labido Isulabido	Techo	Piso	Total
Área del material (Superficie)	10.90	22.90	22.90	30.0	19.0	19.0	19.0	16.12	2.08	10.96	85.0	85.0	257.0
125 Hz	0.01	0.16	0.06	0.07	0.02	0.11	0.01	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.26
250 Hz	0.01	0.35	0.15	0.01	0.12	0.33	0.01	0.01	0.06	0.02	0.01	0.01	0.69
500 Hz	0.02	0.60	0.30	0.02	0.30	0.59	0.02	0.02	0.08	0.09	0.01	0.01	0.17
1000 Hz	0.05	0.72	0.45	0.05	0.45	0.70	0.05	0.05	0.10	0.04	0.02	0.02	0.23
2000 Hz	0.07	0.86	0.55	0.07	0.55	0.86	0.07	0.07	0.10	0.05	0.02	0.02	0.22
4000 Hz	0.03	0.48	0.05	0.03	0.05	0.48	0.03	0.03	0.10	0.07	0.02	0.02	0.24

Panuelos + Ficus + Philodendro

Cantidad de Bolsas: 24

Heliconia + Philodendro

Cantidad de Bolsas: 20

Ficus

Philodendro

Se muestra el coeficiente de absorción del material en cada una de las frecuencias

Total 125	0.0	0.2	0.1	0.3	1.0	3.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	6.7
Total 250	0.0	0.4	0.1	0.3	2.3	6.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	11.3
Total 500	0.0	0.6	0.3	0.6	5.7	10.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	20.5
Total 1000	0.1	0.7	0.5	1.5	6.8	13.3	1.0	0.1	0.1	0.0	1.7	1.7	29.1
Total 2000	0.1	0.8	0.6	2.1	10.5	18.0	1.3	0.1	0.1	0.1	1.7	1.7	31.9
Total 4000	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4

Volumen del espacio (m3)	249
--------------------------	-----

Tempo de Reverberación	Tempo de Reverberación Promedio
Total 125	6.83
Total 250	3.14
Total 500	1.96
Total 1000	1.38
Total 2000	1.06
Total 4000	0.08



Tabla 24-3er escenario panel rígido-Autoría propia

Figura 41-3er escenario-Autoría propia

■ 4to escenario con filtro con bolsillos:

Celdas para modificar | Añadir información

Superficie intervenida

Materiales	Superficie 1-MURO 1	Superficie 1-VEGETACIÓN	Superficie 2-SOPORTE FILTROS	Superficie 2-MURO 2	Superficie 2-VEGETACIÓN	Superficie 3-SOPORTE FILTROS	Superficie 3-VEGETACIÓN	Superficie 4-Muro	Superficie 4-Muro	Panuelos labido Isulabido	Techo	Piso	Total
Área del material (Superficie)	0.86	22.90	0.06	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	23.72
125 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
250 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
500 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
1000 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2000 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4000 Hz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Panuelos + Ficus + Philodendro

Cantidad de Bolsas: 24

Heliconia + Philodendro

Cantidad de Bolsas: 20

Ficus

Philodendro

Se muestra el coeficiente de absorción del material en cada una de las frecuencias

Total 125	0.0	0.2	0.1	0.3	1.0	3.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	6.7
Total 250	0.0	0.4	0.1	0.3	2.3	6.3	0.2	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	11.3
Total 500	0.0	0.6	0.3	0.6	5.7	10.0	0.4	0.0	0.1	0.0	0.9	0.9	20.5
Total 1000	0.1	0.7	0.5	1.5	6.8	13.3	1.0	0.1	0.1	0.0	1.7	1.7	29.1
Total 2000	0.1	0.8	0.6	2.1	10.5	18.0	1.3	0.1	0.1	0.1	1.7	1.7	31.9
Total 4000	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4

Volumen del espacio (m3)	249
--------------------------	-----

Tempo de Reverberación	Tempo de Reverberación Promedio
Total 125	6.89
Total 250	3.16
Total 500	1.98
Total 1000	1.41
Total 2000	1.09
Total 4000	0.09

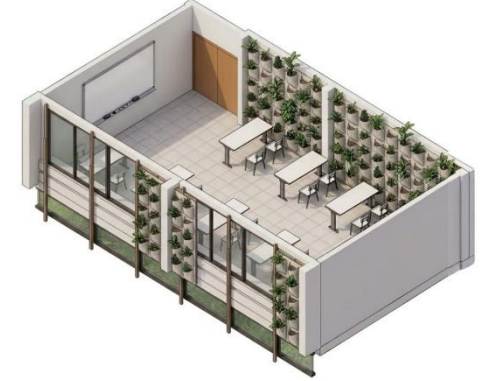


Tabla 25-4to escenario panel rígido-Autoría propia

Figura 42-4to escenario-Autoría propia

Modelos 3d escenarios:

-1er escenario con sistema modular (panel rígido):

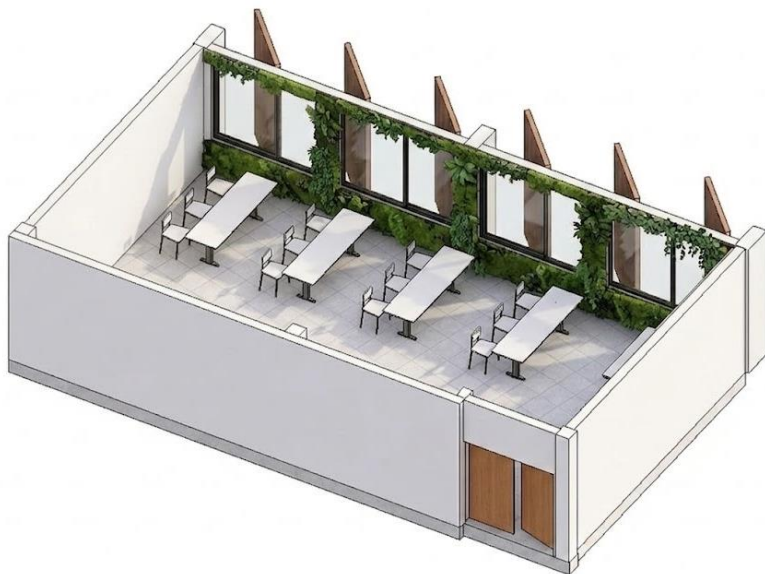


Figura 43-1er escenario (panel rígido)-Autoría propia

-2do escenario con sistema modular (panel rígido):



Figura 44-2do escenario (panel rígido)-Autoría propia

-3er escenario con sistema modular (panel rígido):



Figura 45-3er escenario (panel rígido)-Autoría propia

-4to escenario con sistema modular (panel rígido):



Figura 46-4to escenario (panel rígido)-Autoría propia

-1er escenario con filtro con bolsillos:

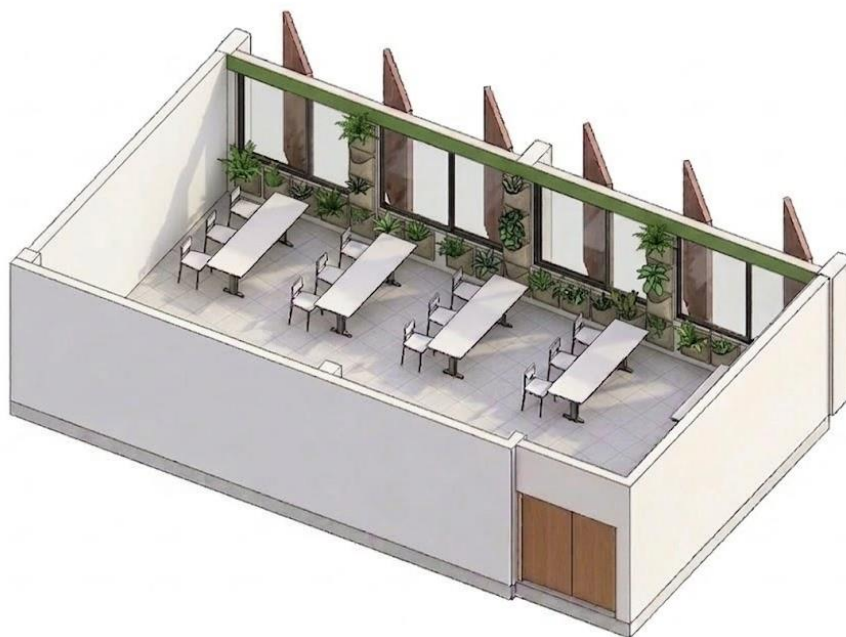


Figura 47-1er escenario (Bolsillos)-Autoría propia

-2do escenario con filtro con bolsillos:



Figura 48-2do escenario (Bolsillos)-Autoría propia

-3er escenario con filtro con bolsillos:

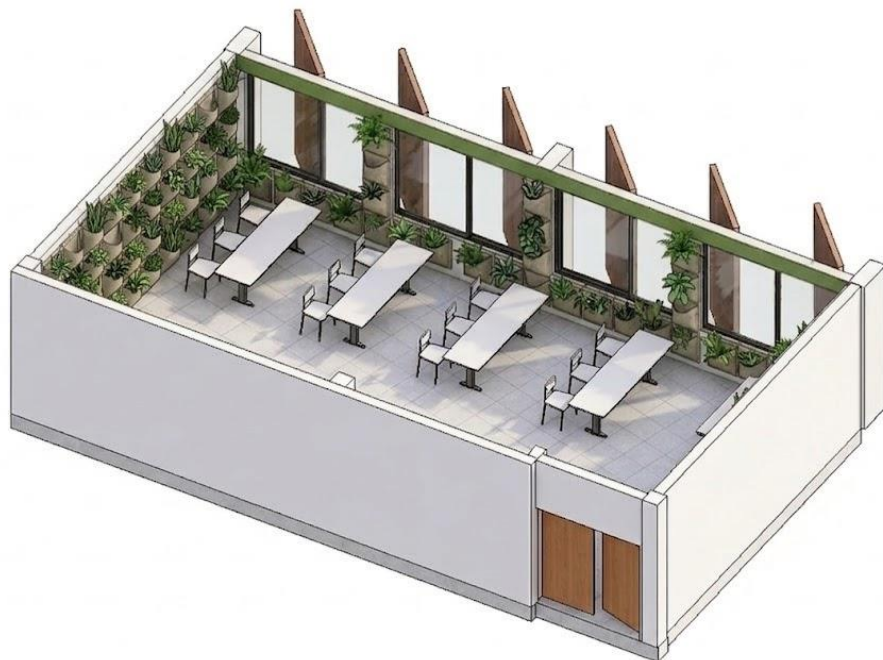


Figura 49-3er escenario (Bolsillos)-Autoría propia

-4to escenario con filtro con bolsillos:



Figura 50-4to escenario (Bolsillos)-Autoría propia

d. Evaluación acústica comparativa

Para cada uno de los escenarios, se calculó nuevamente el Tiempo de Reverberación (TR) mediante la fórmula de Sabine, considerando los nuevos valores de absorción.

Esto permitió:

- Comparar el comportamiento acústico entre el estado inicial y los escenarios intervenidos
- Analizar la influencia del tipo de sistema vegetal
- Evaluar el efecto de la cantidad de superficie intervenida

Tabla 26- Evaluación comparativa-Autoría propia

Sistema	Escenario	Intervención	TR Promedio (s)
Filtro con bolsas	1	Muro 1	8,11
Filtro con bolsas	2	Muro 3	2,37
Filtro con bolsas	3	Muro 1 + 3	2,33
Filtro con bolsas	4	Muros 1 + 2 + 3	0,42
Modular rígido	1	Muro 1	8,07
Modular rígido	2	Muro 3	2,37
Modular rígido	3	Muro 1 + 3	2,33
Modular rígido	4	Muros 1 + 2 + 3	0,42

Conclusiones:

Conclusión 1. Comportamiento del tiempo de reverberación

El análisis de los escenarios evidencia que el tiempo de reverberación disminuye de manera progresiva a medida que aumenta el nivel de intervención en los muros. Los valores iniciales, cercanos a ocho segundos, reflejan condiciones acústicas inadecuadas para un aula. No obstante, al incrementar la superficie intervenida, los valores descienden significativamente hasta alcanzar aproximadamente 0.42 segundos en el escenario de mayor cobertura, lo cual corresponde a condiciones óptimas de confort acústico.

Conclusión 2. Influencia de la superficie intervenida

Se determina que la variable más influyente en la reducción del tiempo de reverberación es la cantidad de superficie intervenida. La incorporación progresiva

de vegetación incrementa la capacidad de absorción sonora y favorece la dispersión de las ondas acústicas, reduciendo la persistencia del sonido en el espacio. En este sentido, la efectividad del sistema depende directamente de la extensión y distribución de la cobertura vegetal.

Conclusión 3. Rol de la vegetación en el acondicionamiento acústico

La vegetación actúa como un material absorbente natural que contribuye significativamente al acondicionamiento acústico del aula. Su desempeño está asociado a la densidad, configuración y disposición en los muros, lo que permite mejorar tanto la absorción como la difusión del sonido dentro del espacio. En este estudio, se priorizó el uso de especies como *helechos*, *pothos*, *philodendron* y *spathiphyllum*, seleccionadas por su alta densidad foliar, capacidad de adaptación a condiciones interiores y comportamiento favorable frente a la absorción sonora. Estas especies, además de aportar masa vegetal, generan superficies irregulares que favorecen la disipación de las ondas acústicas, incrementando la eficiencia del sistema vegetal implementado.

Conclusión 4. Comparación entre sistemas constructivos

Los resultados obtenidos muestran que tanto el sistema modular rígido como el sistema de fieltro con bolsas presentan comportamientos similares en términos de tiempo de reverberación, a pesar de contar con coeficientes de absorción distintos. Esto se explica porque la fórmula de Sabine considera la absorción total del espacio como una sumatoria global, lo que hace que, en escenarios con alta cobertura vegetal, las diferencias entre materiales pierdan incidencia en el resultado final.

Conclusión 5. Incidencia de la absorción global y redondeo de datos

En los escenarios de mayor intervención, el incremento de la absorción total genera que pequeñas variaciones entre coeficientes no sean perceptibles en el resultado del tiempo de reverberación. Adicionalmente, el redondeo de los valores contribuye a que estas diferencias no se evidencien claramente, sin afectar la tendencia general del análisis.

Conclusión 6. Variable determinante del desempeño acústico

Se concluye que el desempeño acústico del espacio no está determinado de manera significativa por el tipo de sistema constructivo, sino por la cantidad de vegetación incorporada y el área total intervenida. En este sentido, ambos sistemas evaluados son viables desde el punto de vista acústico.

Conclusión 7. Validación de los sistemas vegetales

La implementación de muros verdes se consolida como una estrategia efectiva para el acondicionamiento acústico en espacios interiores, al permitir una reducción

significativa del tiempo de reverberación mediante el aumento de superficies absorbentes naturales.

Conclusión 8. Escenario óptimo de intervención

El escenario más adecuado corresponde a la intervención de las superficies 1 y 3, ya que permite un equilibrio entre eficiencia acústica y viabilidad de implementación. Desde el punto de vista técnico, la superficie 1 actúa como el principal plano de incidencia del ruido exterior, por lo que su tratamiento contribuye a reducir de manera directa la entrada de energía sonora al espacio. Por su parte, la superficie 3 funciona como un plano reflectante relevante dentro del aula, asociado a las reflexiones secundarias del sonido, especialmente de la voz del docente. Su intervención permite disminuir el efecto de rebote y la acumulación de energía sonora en el interior

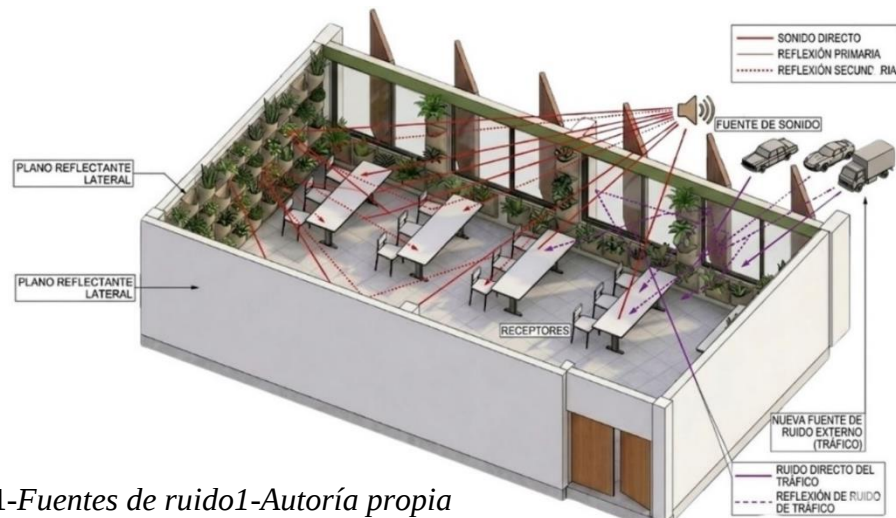


Figura 51-Fuentes de ruido1-Autoría propia

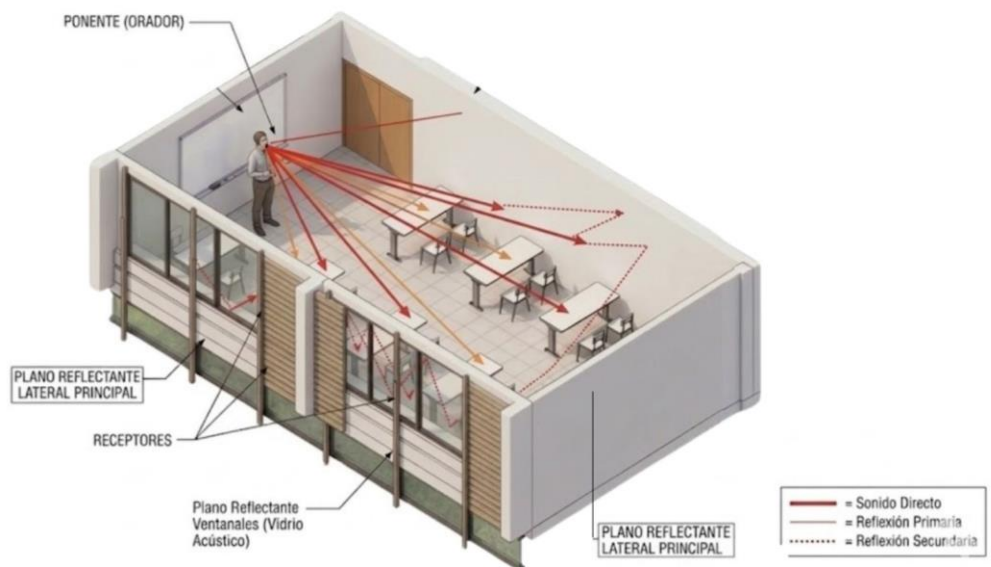


Figura 52- Fuentes de ruido1-Autoría propia

Conclusión general:

A partir del análisis comparativo de los escenarios y de los valores obtenidos de tiempo de reverberación, se concluye que ambos sistemas evaluados presentan un comportamiento acústico similar en términos globales, debido a que la variable dominante en la mejora del acondicionamiento acústico es la cantidad de superficie vegetal incorporada y no únicamente el tipo de soporte. Sin embargo, considerando criterios adicionales como la adaptabilidad, la interacción material–vegetación y la eficiencia en la absorción sonora, el sistema de **filtro con bolsas** se establece como el más adecuado para el desarrollo de la investigación. Este sistema permite una mayor porosidad, favorece la interacción entre el aire, el sustrato y las raíces, y potencia los mecanismos de absorción y disipación del sonido.

En cuanto a la selección del escenario óptimo, se determina que el escenario tres representa la mejor alternativa de intervención dentro del equilibrio entre eficiencia acústica y viabilidad proyectual. Este escenario plantea la intervención de la superficie uno y la superficie tres, lo cual resulta estratégico desde el punto de vista acústico. Por un lado, la superficie uno corresponde al principal plano de incidencia del ruido exterior, por lo que su tratamiento permite mitigar de manera directa la entrada de energía sonora al espacio. Por otro lado, la superficie tres actúa como un plano reflectante relevante dentro del aula, asociado al fenómeno de reflexiones secundarias del sonido, particularmente de la voz del docente. Su intervención contribuye a reducir el efecto de rebote y la acumulación de energía sonora en el interior.

De esta manera, la combinación de estas dos superficies permite no solo controlar la fuente principal de ingreso del ruido, sino también optimizar la distribución interna del sonido, reduciendo la reverberación y mejorando el acondicionamiento acústico del espacio. En consecuencia, el escenario tres, implementado mediante el sistema de filtro con bolsas, se configura como la solución más eficiente y pertinente para el acondicionamiento acústico del aula dentro del marco de la investigación.

Herramienta 5: La herramienta se plantea como una fase de evaluación final dentro del proceso investigativo, en la cual se analizan y comparan los costos reales de implementación de las dos alternativas seleccionadas, a partir de referencias del mercado local en Medellín.

A diferencia de la comparación técnica previa, en esta etapa se incorporan variables económicas concretas, como el costo de materiales, plantas, sistema de riego y mano de obra, obtenidas de proveedores reales como viveros, tiendas de construcción y distribuidores especializados. Esto permite entender no solo la viabilidad teórica de cada sistema, sino su factibilidad real de ejecución en el contexto colombiano.

La herramienta se materializa en tablas comparativas que desglosan los costos por componente, el costo total estimado del proyecto y la diferencia económica entre sistemas, facilitando una lectura clara y objetiva para la toma de decisiones.

Objetivo: Evaluar y comparar la viabilidad económica de las dos alternativas finales de muros verdes, mediante el uso de referencias reales del mercado local, con el fin de determinar cuál sistema es más accesible y coherente con las condiciones de implementación del proyecto.

Criterios del presupuesto:

El cálculo del presupuesto se realizó con base en:

- Área aproximada: 30 m²
- Sistema: muros verdes con bolsillos (geotextil)
- Tipo de vegetación: plantas ornamentales de interior (helechos, filodendros, potus)
- Sistema de riego: riego por goteo básico

Los precios se estiman a partir de valores comerciales en Colombia, específicamente en Medellín, tomando como referencia viveros, tiendas de construcción y proveedores de jardines verticales.

Tabla de costos con referencias reales:

Elemento	Descripción	Costo Aproximado (COP)	Referencia en Medellín
Geotextil / bolsillos	Filtro para jardines verticales	\$80.000 – \$150.000 / m ²	Homecenter / Proveedores geotextiles
Estructura base	Soporte en PVC o metálico	\$60.000 – \$120.000 / m ²	Homecenter
Plantas ornamentales	Helechos, potus, filodendros	\$8.000 – \$25.000 c/u	Vivero Tierra Negra
Sistema de riego	Riego por goteo	\$40.000 – \$80.000 / m ²	Riego Colombia
Sustrato	Mezcla orgánica ligera	\$20.000 – \$40.000 / m ²	Homecenter
Mano de obra	Instalación	\$70.000 – \$120.000 / m ²	Referencia local Medellín

Tabla Costo total estimado (30 m²):

Componente	Costo Total (COP)
Materiales	\$4.500.000 – \$8.000.000
Plantas	\$2.000.000 – \$4.000.000
Sistema de riego	\$1.200.000 – \$2.400.000
Mano de obra	\$2.100.000 – \$3.600.000
TOTAL	\$9.800.000 – \$18.000.000

Tabla 28-Costos-Autoría propia

Tabla 27-Costo total-Autoría propia

Comparación con sistema modular:

Sistema	Costo por m ² (COP)	Costo total 30 m ² (COP)	Referencia
Modular	\$900.000 – \$1.200.000	\$27.000.000 – \$36.000.000	Empresas muros verdes Colombia
Bolsillos	\$350.000 – \$600.000	\$9.800.000 – \$18.000.000	Viveros + construcción local

Tabla 29-Comparación costos-Autoría propia

Análisis económico final:

El sistema de bolsillos resulta significativamente más económico debido a:

- Uso de materiales accesibles en el mercado local
- Menor complejidad estructural
- Posibilidad de instalación con mano de obra local

Además, todos los componentes pueden ser adquiridos en Medellín sin necesidad de importación, lo que reduce costos logísticos.

Conclusión económica:

El análisis de costos, sustentado en referencias reales del mercado en Medellín, demuestra que el sistema de muros verdes con bolsillos es una alternativa viable y accesible. La disponibilidad local de materiales y proveedores permite su implementación sin requerimientos técnicos especializados de alto costo, a diferencia del sistema modular.

Esto refuerza la elección del sistema de bolsillos no solo desde el punto de vista acústico y espacial, sino también desde su factibilidad económica, consolidándolo como una solución coherente con el contexto real del proyecto.

Herramienta 6: El modelado final permite verificar el comportamiento del sistema seleccionado en condiciones simulada. En este sentido, se establece el sistema de muros verdes con filtro de bolsillos como el más adecuado para el desarrollo de la investigación, debido a su alta porosidad, su capacidad de favorecer la interacción entre el aire, el sustrato y las raíces, y su eficiencia en los procesos de absorción y disipación del sonido.

Asimismo, dentro de los escenarios evaluados, se determina que el escenario tres representa la mejor alternativa de intervención, ya que fue el que logró la mayor reducción del tiempo de reverberación en el espacio analizado. Este resultado lo posiciona como la opción más eficiente desde el punto de vista acústico.

Objetivo: Definir y consolidar la propuesta final de intervención mediante el modelado del sistema seleccionado, validando su efectividad a partir de la reducción del tiempo de reverberación y su viabilidad dentro del contexto del proyecto.



Figura 53-Mapa mental muro verde-Autoría propia

mano:

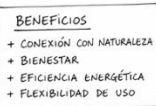


Figura 54-Idea conceptual-Autoría propia

Corte por fachada de detalle:



Planta Final:

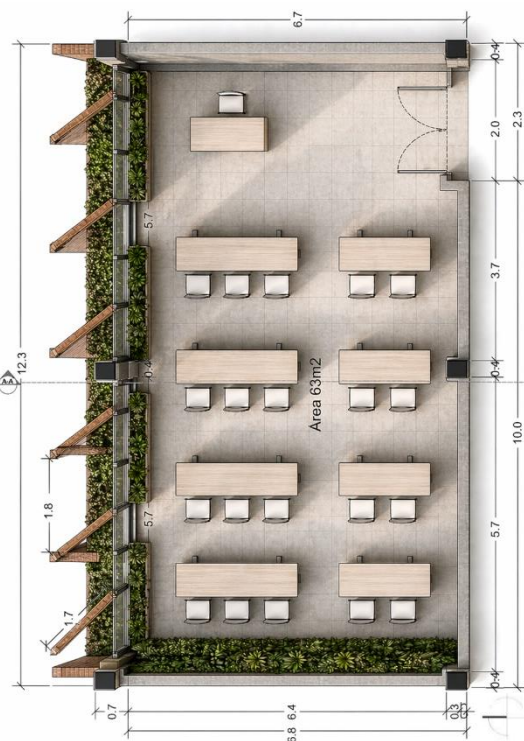


Figura 55-Corte por fachada-Autoría propia

Figura 56-Planta final-Autoría propia



Figura 57-Isométrico final-Autoría propia

Renders finales:



Figura 58-Render final 1-Autoría propia



Figura 60- *Render final 2-Autoría propia*



Figura 59- *Render final 3-Autoría propia*



Figura 61- *Render final 4-Autoría propia*



Figura 62- *Render final 5-Autoría propia*

8 Discusión

La presente investigación permite abrir una reflexión crítica en torno al papel del acondicionamiento acústico dentro del diseño arquitectónico contemporáneo, especialmente en contextos educativos donde la calidad del ambiente interior incide directamente en los procesos de aprendizaje.

Uno de los principales aportes del estudio radica en el cambio de enfoque frente al tratamiento del sonido. Tradicionalmente, las problemáticas acústicas han sido abordadas desde la reducción de estímulos externos o mediante soluciones tecnológicas especializadas. Sin embargo, esta investigación demuestra que el problema puede ser entendido desde una perspectiva interna, en la que el comportamiento del sonido depende de la configuración del espacio y de su capacidad para absorber o reflejar la energía sonora.

En este sentido, el tiempo de reverberación emerge como una variable central no solo de evaluación, sino también de diseño. Su control permite entender cómo el sonido permanece en el espacio y cómo esta permanencia afecta la calidad acústica. La investigación evidencia que tiempos de reverberación elevados generan una superposición de ondas sonoras que deteriora la claridad del ambiente, mientras que su disminución permite mejorar significativamente la inteligibilidad.

Por otro lado, la incorporación de infraestructura verde plantea una discusión relevante sobre el papel de los elementos naturales dentro de la arquitectura. Más allá de su función ambiental o estética, la vegetación se posiciona como un material con propiedades físicas capaces de incidir en el comportamiento del sonido. Esto amplía la comprensión de los sistemas constructivos tradicionales y abre nuevas posibilidades para el diseño pasivo del acondicionamiento acústico.

Asimismo, los resultados obtenidos permiten cuestionar la dependencia de soluciones altamente tecnificadas, demostrando que estrategias simples, basadas en la disposición y caracterización de superficies, pueden generar cambios significativos en el tiempo de reverberación y, por ende, en la calidad acústica del espacio.

No obstante, la investigación también presenta limitaciones, particularmente en relación con la evaluación a largo plazo del desempeño de la vegetación y su comportamiento frente a variables ambientales cambiantes. Esto sugiere la necesidad de continuar explorando estos sistemas desde una perspectiva más amplia que integre aspectos técnicos, ambientales y de mantenimiento.

En conclusión, la discusión plantea que el acondicionamiento acústico debe ser entendido como una dimensión integral del diseño arquitectónico, en la que la relación entre espacio, materialidad y naturaleza permite construir ambientes más confortables, eficientes y sostenibles.

9 Conclusiones

La presente investigación permitió comprender el acondicionamiento acústico como un componente determinante en la calidad del ambiente interior de los espacios educativos, abordando el comportamiento del sonido desde una perspectiva integral en la que intervienen simultáneamente la configuración espacial, la materialidad y la relación entre las superficies del recinto.

A partir del análisis del salón 314 del Bloque 10, se evidenció que el espacio presenta un desempeño acústico inadecuado, caracterizado por tiempos de reverberación elevados que superan los rangos recomendados para actividades académicas. Esta condición genera una permanencia excesiva de la energía sonora dentro del aula, afectando la claridad del sonido y produciendo una superposición de reflexiones que deteriora la calidad del ambiente acústico.

El estudio permitió identificar que este comportamiento no responde a una única variable, sino a la interacción de múltiples factores. Por un lado, la predominancia de materiales con baja capacidad de absorción favorece la reflexión continua del sonido; por otro, la configuración espacial del aula y la proporción de superficies disponibles para tratamiento limitan el control acústico del recinto. Asimismo, la relación entre los planos verticales y horizontales contribuye a la acumulación de energía sonora en determinadas zonas, generando una distribución desigual del sonido.

Mediante la aplicación de una metodología que integró medición técnica y análisis perceptivo, se logró establecer una comprensión precisa del comportamiento del tiempo de reverberación como variable central en la evaluación del acondicionamiento acústico. Este enfoque permitió no solo diagnosticar el problema, sino también proyectar escenarios de mejora basados en modificaciones controladas del espacio.

En este contexto, la investigación demostró que la incorporación de infraestructura verde en fachada constituye una estrategia pasiva eficaz para el acondicionamiento acústico. La vegetación, al introducir superficies con mayor porosidad, densidad e irregularidad, modifica la interacción del sonido con el espacio, favoreciendo procesos de absorción y dispersión que inciden directamente en la disminución del tiempo de reverberación.

Los resultados obtenidos evidencian que es posible llevar el tiempo de reverberación desde condiciones inadecuadas hacia rangos óptimos para el uso educativo, mediante la implementación de superficies vegetales dispuestas estratégicamente. Esto confirma que el acondicionamiento acústico no depende exclusivamente de soluciones tecnológicas especializadas, sino que puede abordarse a través de estrategias arquitectónicas integradas.

En consecuencia, se concluye que la infraestructura verde puede ser entendida como un componente activo del diseño arquitectónico, capaz de optimizar el comportamiento del sonido dentro del espacio, disminuyendo los tiempos de reverberación y mejorando la calidad acústica del ambiente interior. De este modo, la vegetación trasciende su función ambiental o estética para consolidarse como un elemento técnico dentro del acondicionamiento acústico.

Conclusiones finales

A partir del desarrollo de la investigación, se establecen las siguientes conclusiones finales, las cuales sintetizan los hallazgos más relevantes y consolidan los aportes del estudio en relación con el acondicionamiento acústico y el control del tiempo de reverberación:

En primer lugar, se determina que el desempeño acústico de un espacio no depende únicamente de la presencia de estímulos sonoros, sino de la manera en que la configuración arquitectónica y los materiales condicionan la permanencia del sonido en su interior. En este sentido, el tiempo de reverberación se posiciona como la variable clave para comprender y evaluar el acondicionamiento acústico.

En segundo lugar, la investigación valida que la incorporación de infraestructura verde constituye una estrategia efectiva para mejorar el acondicionamiento acústico, al permitir una disminución significativa del tiempo de reverberación. Esto se debe a que la vegetación introduce condiciones físicas que transforman el comportamiento del sonido dentro del espacio, reduciendo su persistencia y favoreciendo una mayor claridad acústica.

En tercer lugar, se concluye que la vegetación funciona como un sistema material complejo, cuyas propiedades) como la porosidad, la densidad foliar y la irregularidad superficial (Permiten no solo la absorción, sino también la dispersión de las ondas sonoras. Esta doble condición resulta fundamental para controlar la acumulación de energía sonora y, por tanto, para optimizar el tiempo de reverberación.

Asimismo, se establece que la efectividad del acondicionamiento acústico no depende exclusivamente del tipo de sistema constructivo implementado, sino principalmente de la cantidad de superficie intervenida y de su ubicación dentro del espacio. Intervenir los planos de mayor incidencia sonora permite generar cambios más significativos en el tiempo de reverberación que intervenciones distribuidas sin criterio acústico.

Otro hallazgo relevante es que, aunque existen diferencias entre los sistemas de muros verdes analizados, estas pierden relevancia en escenarios donde la cobertura vegetal es suficiente. Sin embargo, el sistema de muros verdes con filtro de bolsillos se posiciona como la alternativa más adecuada, al ofrecer una mayor continuidad superficial y mejores condiciones para la absorción acústica, además de su viabilidad técnica y económica.

De igual manera, la investigación evidencia la importancia de integrar metodologías que articulen medición, simulación y percepción del usuario, ya que el acondicionamiento acústico no se limita a valores cuantitativos, sino que se manifiesta en la experiencia espacial del sonido.

Finalmente, se concluye que el acondicionamiento acústico debe ser incorporado como un criterio fundamental desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico. La implementación de estrategias pasivas como la infraestructura verde permite intervenir el comportamiento del sonido de manera eficiente y sostenible, disminuyendo los tiempos de reverberación y mejorando las condiciones acústicas de los espacios educativos.

Conclusiones específicas:

- 1. Sobre el comportamiento acústico del espacio**
El análisis del aula permitió identificar un comportamiento acústico caracterizado por la alta permanencia del sonido en el interior, evidenciado en tiempos de reverberación elevados. Esta condición se origina en la interacción entre la configuración espacial y la predominancia de superficies reflectantes, lo que genera múltiples reflexiones que prolongan la presencia de la energía sonora en el recinto y afectan la claridad del ambiente acústico.
- 2. Sobre la relación entre materiales y tiempo de reverberación**
Los materiales presentes en el aula presentan una baja capacidad de absorción acústica, lo que incrementa la cantidad de energía sonora reflejada dentro del espacio. Esta condición incide directamente en el aumento del tiempo de reverberación, demostrando que la selección material es un factor determinante en el acondicionamiento acústico y en la calidad sonora del ambiente interior.
- 3. Sobre la configuración de la fachada**
La alta proporción de vanos en la fachada condiciona el comportamiento acústico del aula al limitar las superficies disponibles para la incorporación de materiales absorbentes. Esta característica reduce la capacidad de control del tiempo de reverberación y afecta la estabilidad del comportamiento sonoro dentro del espacio.
- 4. Sobre la distribución del sonido en el espacio**
El comportamiento del sonido dentro del aula no es uniforme, sino que presenta concentraciones de energía sonora en zonas específicas, especialmente en áreas cercanas a superficies reflectantes. Esta condición evidencia que el acondicionamiento acústico depende no solo de la cantidad de absorción, sino de la distribución estratégica de las superficies que interactúan con el sonido.
- 5. Sobre la efectividad de la infraestructura verde**
La incorporación de infraestructura verde permite modificar el comportamiento del sonido dentro del espacio al introducir superficies porosas e irregulares que favorecen la absorción y dispersión sonora. Esto se traduce en una disminución significativa del tiempo de reverberación y en una mejora de la calidad acústica del ambiente interior.
- 6. Sobre el tiempo de reverberación como variable principal de diseño**
El tiempo de reverberación se consolida como el indicador más relevante para evaluar el acondicionamiento acústico, ya que refleja directamente la permanencia del sonido en el espacio. Su control permite mejorar la inteligibilidad y la calidad del ambiente acústico, convirtiéndose en un criterio fundamental dentro del diseño arquitectónico.
- 7. Sobre la cantidad y ubicación de la intervención**
La disminución del tiempo de reverberación está directamente relacionada con la cantidad de superficie intervenida y su ubicación dentro del espacio. La intervención en los planos de mayor reflexión permite generar cambios más efectivos en el comportamiento acústico que intervenciones distribuidas sin una lógica estratégica.
- 8. Sobre la comparación de sistemas de muros verdes**
El sistema de muros verdes con filtro de bolsillos presenta un mejor desempeño en el acondicionamiento acústico al generar superficies continuas, densas y porosas que favorecen la absorción sonora. Esto contribuye de manera más eficiente a la reducción del tiempo de reverberación en comparación con otros sistemas evaluados.

9. **Sobre la integración entre arquitectura y acústica**
El comportamiento del sonido dentro del espacio está directamente vinculado a las decisiones arquitectónicas, lo que demuestra que el acondicionamiento acústico debe ser considerado como parte integral del diseño y no como una intervención posterior.
10. **Sobre la vegetación como material de acondicionamiento acústico**
La vegetación se consolida como un material arquitectónico activo capaz de incidir en el comportamiento del sonido mediante procesos de absorción y dispersión. Su implementación permite disminuir el tiempo de reverberación y mejorar el desempeño acústico del espacio de manera sostenible.

Cumplimiento de objetivos de la investigación

Objetivo	Cómo se desarrolló	Resultado y alcance
Objetivo general: Diseñar una propuesta de infraestructura verde en fachada que mejore el confort acústico	Se desarrolló mediante un proceso metodológico en tres etapas: diagnóstico del comportamiento acústico, evaluación de escenarios con vegetación (densidad, cobertura y distribución) y formulación de una propuesta arquitectónica en fachada.	Se logró una propuesta viable que disminuye los tiempos de reverberación y mejora el comportamiento acústico, demostrando la efectividad de la vegetación como sistema de acondicionamiento.
Objetivo específico 1: Analizar condiciones acústicas del aula	Se realizó un diagnóstico integral considerando materiales, geometría, configuración espacial y simulación del comportamiento del sonido.	Se identificaron tiempos de reverberación elevados y distribución sonora deficiente, estableciendo una base clara para la intervención.
Objetivo específico 2: Evaluar impacto de la vegetación	Se simularon distintos escenarios variando densidad, forma, cantidad y distribución de la vegetación en fachada.	Se comprobó que mayor cobertura y mejor ubicación reducen significativamente el tiempo de reverberación.
Objetivo específico 3: Proponer diseño de infraestructura verde	Se diseñó un sistema de muros verdes tipo bolsillos con ubicación estratégica según análisis previo.	Se obtuvo una solución que optimiza el confort acústico, disminuye la reverberación y es viable técnica y constructivamente.

Tabla 30-Cumplimiento de objetivos de la investigación-Autoría propia

10 Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos en la investigación, se plantean una serie de recomendaciones orientadas a fortalecer el acondicionamiento acústico en espacios educativos, así como a orientar futuras intervenciones y desarrollos proyectuales.

En primer lugar, se recomienda incorporar el acondicionamiento acústico como un criterio fundamental desde las etapas iniciales del diseño arquitectónico. Tal como se evidenció en el desarrollo del estudio, las condiciones espaciales, la geometría del recinto y la selección de materiales influyen directamente en el comportamiento del sonido y, particularmente, en el tiempo de reverberación. Por lo tanto, abordar estas variables desde el inicio permite evitar problemáticas asociadas a la persistencia sonora y reduce la necesidad de intervenciones correctivas posteriores.

En segundo lugar, se sugiere priorizar el uso de materiales con mayor capacidad de absorción acústica en espacios destinados a actividades académicas. La investigación demostró que la predominancia de superficies reflectantes incrementa el tiempo de reverberación, afectando la calidad del ambiente interior. En este sentido, la incorporación de superficies porosas, tanto naturales como artificiales, resulta clave para mejorar el acondicionamiento acústico.

Asimismo, se recomienda implementar estrategias pasivas de diseño, como la infraestructura verde, que permitan intervenir el comportamiento del sonido de manera sostenible. La vegetación, al actuar como un material absorbente y dispersor, contribuye a la disminución del tiempo de reverberación sin requerir sistemas tecnológicos complejos, lo que la convierte en una alternativa viable y adaptable a distintos contextos arquitectónicos.

En relación con la intervención en fachadas, se recomienda considerar la cantidad y ubicación de la superficie vegetal como variables prioritarias de diseño. Tal como se evidenció en la investigación, la efectividad del acondicionamiento acústico no depende únicamente del sistema constructivo, sino de la cobertura y disposición estratégica de la vegetación en los planos de mayor incidencia sonora.

Adicionalmente, se recomienda el uso de herramientas de cálculo y referencia técnica que permitan evaluar de manera precisa el comportamiento acústico de los espacios. En este sentido, es pertinente utilizar la **fórmula de Sabine** para el cálculo del tiempo de reverberación, la cual permite relacionar el volumen del espacio con la absorción total de sus superficies, facilitando la toma de decisiones en el diseño.

De igual manera, se sugiere apoyarse en tablas de coeficientes de absorción acústica de materiales, comúnmente utilizadas en acústica arquitectónica, como las establecidas en normas internacionales (por ejemplo, ISO o compilaciones técnicas de coeficientes de absorción por frecuencia). Estas tablas permiten seleccionar materiales de manera informada según su capacidad de absorción, contribuyendo a un mejor control del tiempo de reverberación y al adecuado acondicionamiento acústico del espacio.

Por otra parte, se sugiere profundizar en estudios que integren variables adicionales como el mantenimiento, la durabilidad y el comportamiento a largo plazo de los sistemas de infraestructura verde, con el fin de garantizar su sostenibilidad en el tiempo.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones continúen explorando la relación entre arquitectura, paisaje y acústica, ampliando el análisis a otros tipos de espacios y escalas, de manera que se consolide una visión interdisciplinar del acondicionamiento acústico en el diseño arquitectónico.

Referencias

- Aletta, F., Kang, J., & Axelsson, Ö. (2016). Soundscape descriptors and a conceptual framework for developing predictive soundscape models. *Landscape and Urban Planning*, 149, 65–74.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2020). *Informe de mapas de ruido de los municipios de Bello, Itagüí y Medellín*. AMVA. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Ruido/Informe-Itagui-mapa-de-ruido.pdf>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2021). *Actualización de los mapas de ruido de la zona urbana de Medellín*. AMVA. <https://es.scribd.com/document/640131654/Informe-Medellin-mapa-de-ruido>
- Bakker, C., Lugten, A., & Tenpierik, M. (2023). Green façades as acoustic barriers: The effect of foliage density and substrate on noise reduction. *Building and Environment*.
- Ballesterio, M. (2014). *La acústica arquitectónica: Historia y fundamentos técnicos*. Editorial Síntesis.
- Barron, M. (2010). *Auditorium acoustics and architectural design* (2nd ed.). Spon Press.
- Benedict, M. A., & McMahon, E. T. (2006). *Green infrastructure: Linking landscapes and communities*. Island Press.
- Brown, R. D., & Corry, R. C. (2011). Evidence-based landscape architecture: The maturing of a profession. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 327–329. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.01.017>
- Cerema. (2016). *Étude sur l'efficacité acoustique des murs végétalisés en milieu urbain*. Francia.
- Everest, F. A., & Pohlmann, K. C. (2015). *Master handbook of acoustics* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- Gómez-Baggethun, E., & Barton, D. N. (2013). Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological Economics*, 86, 235–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2012.08.019>
- González, M., & López, A. (2017). Mapas de ruido: Simulación de escenario complejo zona centro de Medellín. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Mapas-de-ruido-simulacion-de-escenario-complejo-zona-centro-de-Medellin_fig4_315958232
- Hopkins, C. (2012). *Sound insulation*. Routledge.
- Kang, J. (2007). *Urban sound environment*. Taylor & Francis.
- Kang, J., & Schulte-Fortkamp, B. (2016). *Soundscape and the built environment*. CRC Press.

Kuttruff, H. (2017). *Acoustics: An introduction* (5th ed.). CRC Press.

Long, M. (2014). *Architectural acoustics* (2nd ed.). Academic Press.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Resolución 627 de 2006: Por la cual se establece la norma nacional de emisión de ruido y ruido ambiental*. Diario Oficial No. 46.226. <https://www.mincit.gov.co/ministerio/normograma-sig/procesos-de-apoyo/gestion-de-recursos-fisicos/resoluciones/resolucion-627-de-2006.aspx>

Ministerio de Salud y Protección Social. (1996). *Resolución 8321 de 1983: Normas sobre protección y conservación de la audición y control de ruido ocupacional*. <https://www.minsalud.gov.co>

Muñoz, C., & Jaramillo, J. (2018). La gestión del ruido ambiental en Medellín: Avances y desafíos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 17(32), 113–128. <https://doi.org/10.22395/rium.v17n32a8>

Organización Mundial de la Salud. (2018). *Environmental noise guidelines for the European Region*. WHO Regional Office for Europe.

Pérez, G., & Perini, K. (2018). *Nature-based strategies for urban and building sustainability*. Butterworth-Heinemann.

Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., González, J. M., & Cabeza, L. F. (2010). Green vertical systems for buildings as passive acoustic insulation. *Applied Acoustics*, 71(9), 888–896.

Tang, D., Yang, H., & Choi, Y. (2021). Acoustic performance of different green wall systems in urban buildings. *Science and Technology for the Built Environment*, 27(5), 603–614.

Thomazelli, O., Caetano, R., & Bertoli, S. (2016). Acoustic properties of green walls: Absorption and insulation. *Journal of Building Acoustics*, 23(4), 253–270.

Torres, J. A. (2012). *Acústica arquitectónica: Teoría y práctica*. Universidad Politécnica de Valencia.

Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2012). On the acoustical efficiency of green roofs. *Building and Environment*, 61, 34–44.

Estamos en la Onda. (s. f.). ¿Hay contaminación acústica? <https://estamosenlaonda.weebly.com/iquesthay-contaminacioacuten.html>

Manso, M., Castro-Gomes, J. P., Marchacz, M., Górski, M., Dulak, L., & Żuchowski, R. (2017). Acoustic evaluation of a new modular system for green roofs and green walls. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 10(2).

Navacerrada, M. A., Oquendo-Di Cosola, V., Ruiz García, L., & Olivieri, F. (2024). Absorción acústica de una fachada vegetal mediante una pistola de impedancia. En *XIII Congreso Ibérico de Acústica / TECNIACÚSTICA 2024*.

Azkorra, Z., Pérez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., Álvaro, J. E., Erkoreka, A., & Urrestarazu, M. (2015). Evaluación de muros verdes como sistema de aislamiento acústico pasivo para edificios. *Applied Acoustics*, 89, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>

Yang, T., Hu, L., Xiong, X., Petru, M., Noman, M. T., Mishra, R., & Militký, J. (2020). Propiedades de absorción acústica de las fibras naturales: Una revisión. *Sustainability*, 12(20), 8477. <https://doi.org/10.3390/su12208477>

Velis, A., Posse, C., & Rizzo La Malfa, A. (2019). Absorción acústica de jardines verticales. *Revista Elektron*, 3(1), 10–15.

Anexos

Link de Drive con los archivos de las calculadoras adjuntos:

[Calculadora Tiempos de reverberación 1.xlsx](#)