

Sound insulation parameters of a roof prototype built with ecological materials

Ede C. Martínez¹, Lesvia Pérez L.¹, Celso E. Llimpe Q.²

¹Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela.
edecmartinez@gmail.com

²Laboratorio de Acústica, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú

Abstract

Our main objective was to design a sound insulation system using some ecological materials from the region. Was conditioned sound test module and perform the calculation of the acoustic parameters of the insulation system, for which it was built a module of sound test. The tests were developed by adapting acoustic measurement methodology recommended by the international standard ISO 140-5. The experimentation setup consisted of pink noise generator, an amplifier and a speakers system. For the calculation of the acoustic parameters called apparent level difference and apparent sound reduction index that characterized the isolation of the materials used, were measured sound pressure levels for 1/3 octave in the external and internal environment of the test module, furthermore the reverberation time. It was determined that the substrate with thicknesses of 10 cm and 20 cm, they isolated 42 dB and 44 dB respectively. The vegetation did not provide sound insulation improvements.

Keywords: sound insulation, environmental noise, organic materials, testing in situ.

Parámetros de aislamiento acústico de un prototipo de techo construido con materiales ecológicos

Resumen

Uno de los objetivos principales fue diseñar un sistema de aislamiento acústico utilizando algunos materiales ecológicos propios de la región. Se acondicionó un módulo de ensayos sonoros y se calcularon los parámetros acústicos del sistema de aislamiento. Los ensayos se desarrollaron adaptando la metodología de medición recomendada por la normativa internacional ISO 140-5. La fuente sonora para la experimentación estuvo constituida por un generador de ruido rosado, un amplificador y sistema de altavoces. Para el cálculo de los parámetros acústicos denominados diferencia de nivel estandarizada e índice de reducción sonora aparente, que caracterizaron el aislamiento de los materiales utilizados, se midieron los niveles de presión sonora por 1/3 de octava en el ambiente exterior e interior del módulo de ensayo, además del tiempo de reverberación. Se determinó que los sustratos con espesores de 10 cm y 20 cm aislaron 42 dB y 44 dB respectivamente. La vegetación no aportó mejoras al aislamiento acústico.

Palabras clave: aislamiento acústico en techo, ruido ambiental, materiales ecológicos, ensayo *in situ*.

1. Introducción

El uso de materiales acústicos para la protección de los edificios frente al ruido exterior se viene estudiando cada vez con mayor urgencia,

dado el incremento de los niveles de ruido en las ciudades, como lo mencionan Recuero [1] y Arau [2]. Por otro lado, los elevados costos de los materiales tradicionales para el aislamiento acústico,

estimulan la búsqueda de alternativas locales de materiales ecológicos de menor costo, estos materiales son aquellos que la propia naturaleza proporciona, respetan el medio ambiente y generan una mínima contaminación en su fabricación. En este artículo se presenta el diseño de un sistema de aislamiento acústico en techo utilizando algunos materiales de la región tropical como sustrato de fibra de coco y pelusa de coco, combinados con otros materiales. Es importante tener presente que la fibra de coco no es un material aislante sino absorbente, de bajo costo y fácil de adaptarse como material acústico. Para determinar el aislamiento del techo propuesto se calcularon los parámetros acústicos denominados diferencia de nivel estandarizada e índice de reducción sonora aparente.

En Venezuela, la preocupación por el control de la contaminación sonora se evidencia en los siguientes instrumentos legales: el Decreto N° 2217 “Normas sobre el control de la contaminación generada por ruido”, Norma Venezolana Covenin N° 1433:81 “Determinación del ruido emitido por vehículos de motor” [3]. A nivel europeo se regula el ruido a través de políticas establecidas por la Directiva 2002/49/CE y según las normas específicas para aislamiento en edificios como UNE-EN ISO 717-1 1997 [4] y UNE EN ISO 140-5 1999 [5].

No existen aún, métodos establecidos para el estudio del aislamiento acústico en techos para ambientes exteriores. Sin embargo existen algunos trabajos para mediciones en condiciones de laboratorio Cook [6], Cook [7] y Cook [8]. En

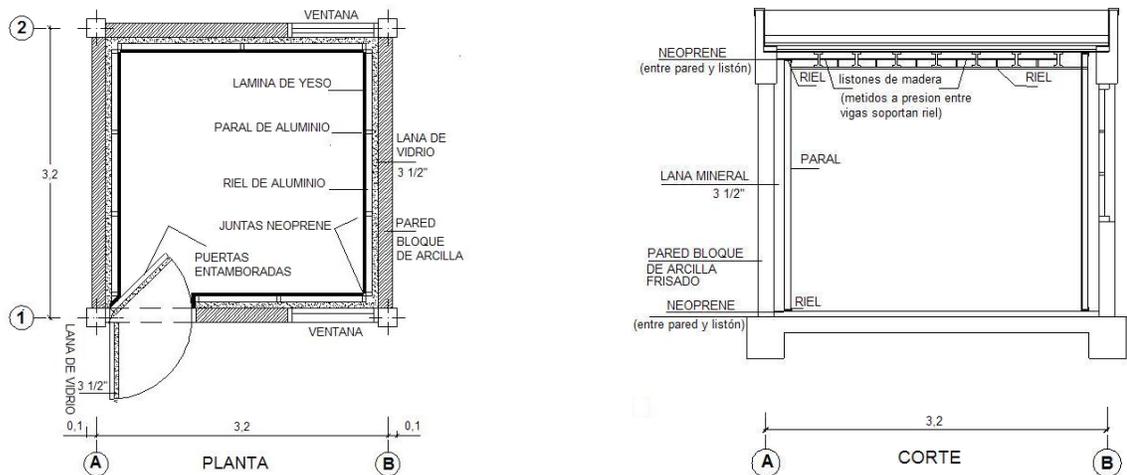
cuanto a la aplicación de los métodos recomendados por la ISO 140-5 para aislamiento de fachadas, se consultaron los trabajos de Sánchez, Pedrero y Gómez [9] y Tadeu, António y Mateus [10]. La ausencia de métodos de experimentación para aislamiento de techos condujo a tomar la decisión de adaptar la norma ISO mencionada, cambiando la ubicación de la fuente, a fin de reducir el ángulo de cobertura de las ondas sonoras, reducir la dispersión de las mismas y mejorar la energía incidente sobre la muestra o prototipo de techo. Los resultados mostrados podrían ser aplicados desde el punto de vista acústico, para brindar mejores condiciones de vida a la sociedad.

2. Diseño, habilitación y ensayo

2.1. Prototipo experimental de techo acústico con materiales ecológicos

El prototipo de techo con materiales ecológicos se construyó sobre un módulo experimental ubicado en el Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad del Zulia, en la ciudad de Maracaibo, Venezuela. Se acondicionaron acústicamente las paredes, puertas y ventanas del módulo para controlar la transmisión de ruido exterior (Figura 1). El espacio interior tiene un área de 2,77 m × 2,76 m, una altura de 2,45 m.

El sistema de aislamiento del techo estuvo conformado por tres capas: la primera (techo



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Esquema del aislamiento acústico del módulo experimental.

base) que cumple la función de soporte y protección de la humedad; la segunda compuesta por materiales ecológicos que tienen la función de aislante, drenaje y sustento de la especie vegetal, y la última con vegetación autóctona de la región tropical (Figura 2).

El techo base se apoyó sobre vigas metálicas conformado por materiales locales livianos de fácil remoción y de bajo costo: lámina metálica de zinc lisa galvanizada de espesor 0,20 mm/Calibre 35 y lámina de fibrocemento de 1 cm de espesor, con un acabado final de pintura impermeabilizante. La película de polietileno fue de baja densidad y espesor de 200 micras, que cumple una función protectora de la humedad del sustrato, anti raíces y tiene un drenaje para la salida del agua. Estos materiales conforman el primer ensayo a realizar (E1).

La segunda capa formada por fibra larga de coco (pelusa) de 3 cm de espesor utilizada para permitir el drenaje al sustrato, además de 7 cm de sustrato compuesto por fibra de coco virgen (fibra larga y aserrín, obtenida moliendo el mesocarpio del fruto de coco nucífera), capa vegetal (suelo franco arenoso) y abono orgánico (materia orgánica sedimentada en la desembocadura de ríos) en una proporción de volumen 4:1:1 (66,7% fibra de coco, 16,67% capa vegetal, 16,67% materia orgánica) de acuerdo a pruebas de caracterización del material tomadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia. Estos materiales junto al techo base conforman el ensayo 2 (E2). Se escogió la fibra de coco por ser un producto natural con elevados índices de rigidez y dureza, baja conductividad al calor, resistente al impacto, a las bacterias y al agua, además tiene propiedades acústicas absorbentes,

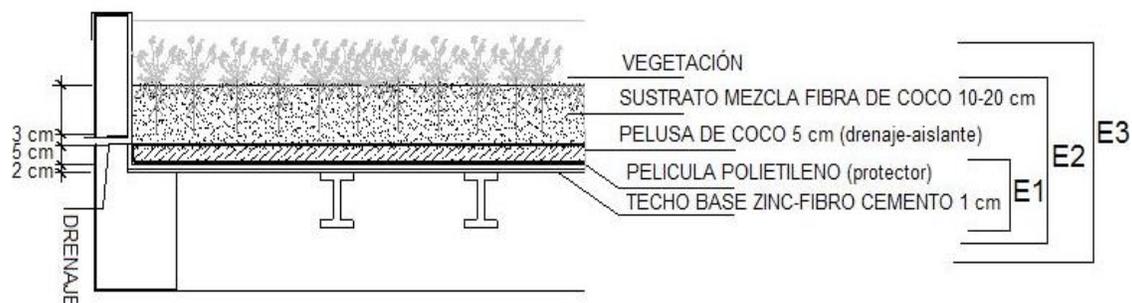
se consigue en la zona y es un material versátil indicado para aislamiento térmico y acústico, Colegio de Apareadores y Arquitectos [11].

La selección de la especie vegetal del trópico húmedo *Aloe barbadensis* (Sábila), está asociada a coberturas extensivas con profundidades de sustrato menores a 15 cm. Son plantas que requieren mínimo mantenimiento, son perennes con tolerancia a periodos de sequía y condiciones estresantes (alta irradiación), Dinsdale, Pearen y Wilson [12]. La vegetación junto con las capas anteriores conforma el ensayo 3 (E3).

2.2. Mediciones de aislamiento acústico

En el ensayo de aislamiento acústico se midió el ruido de fondo, los niveles de presión sonora en los ambientes exterior e interior y el tiempo de reverberación en el dominio de la frecuencia por tercios de octava. Se utilizó como fuente o emisión sonora: Un amplificador de uso profesional, con sistema integrado de generador de ruido rosado y ecualizador paramétrico, un sistema de altavoces compuesto por un subwoofer de 15" para la emisión de ondas sonoras de baja frecuencia, un sistema de altavoces de 12" para la emisión de ondas de media frecuencia y un driver de radiación directa para la emisión de ondas de alta frecuencia.

La instrumentación de recepción sonora estuvo conformada por: un micrófono de patrón de captación omnidireccional de respuesta plana en el dominio de la frecuencia entre 20 Hz a 20 kHz, un sonómetro analizador de clase 1 y un calibrador sonoro de clase 1 (ambos cumplen con los estándares de la IEC 61672).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Esquema del montaje de las capas del prototipo de techo con materiales ecológicos.

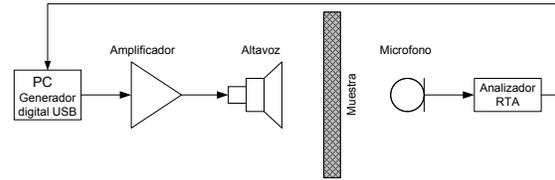
2.2.1. Metodología de medición para determinar el aislamiento acústico

El esquema de la instrumentación utilizada para la medición del aislamiento se muestra en la Figura 3.

Se midió el ruido de fondo (L_b) antes y después de cada ensayo, tanto en el ambiente exterior como en el ambiente interior. Para obtener el nivel de presión sonora L_1 y L_2 , se ubicó el altavoz con un ángulo de incidencia de 59° con respecto a la normal del centro del techo (Figura 4), y el sonómetro a una altura de 2 m sobre el centro de la muestra. Se tomaron 18 medidas del nivel de presión sonora exterior e interior.

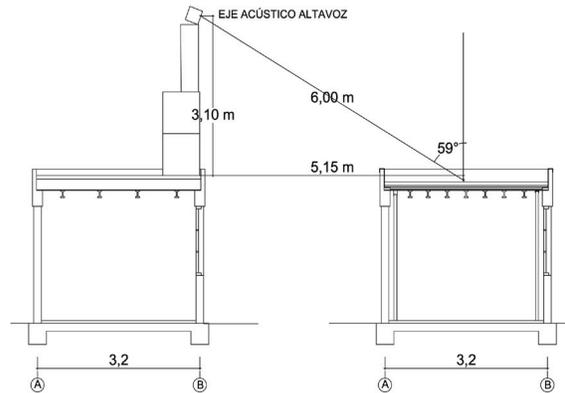
La distribución espacial dentro del módulo fue: las primeras 9 posiciones estaban ubicadas a una altura de 1.50 m respecto del piso y las otras 9 posiciones a una altura de 2 m (Figura 5).

El tiempo de reverberación se obtuvo por el método de fuente impulsiva, utilizando como fuente el sonido generado por la explosión de globos; se tomaron 6 medidas dentro del módulo experimental en 3 posiciones con 2 lecturas cada una.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3. Esquema para la medición del aislamiento acústico.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Esquema de ángulo de incidencia de la fuente sonora.

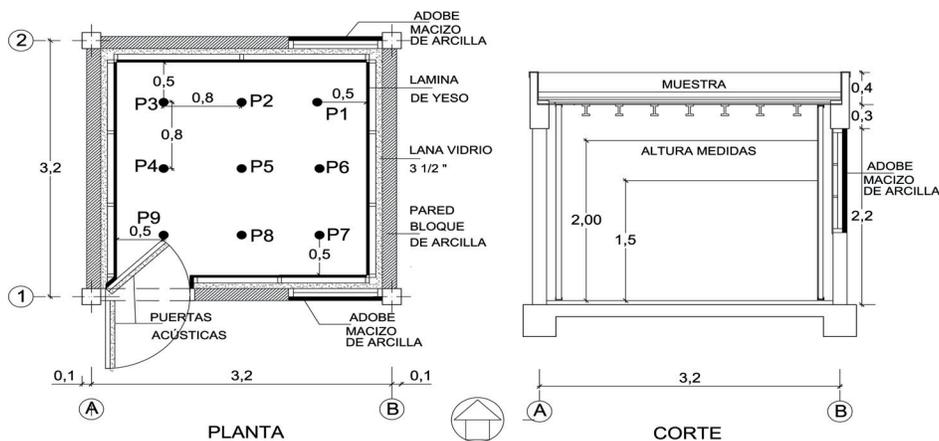
2.3. Determinación de los parámetros acústicos

El ruido de fondo promedio (L_b), nivel de presión sonora exterior (L_1) y nivel de presión interior (L_2) se calculó a partir de las siguientes ecuaciones:

$$L_b = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{bi}/10} \right) \tag{1}$$

$$L_1 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{1i}/10} \right) \tag{2}$$

$$L_2 = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_{2i}/10} \right) \tag{3}$$



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Posiciones micrófono para L_2 , L_b y T_r .

donde n es el número de mediciones realizadas, L_{bi} (dB) son los niveles de presión sonora desde L_{b1} hasta L_{bn} . L_{1i} (dB) niveles de presión sonora exterior desde L_{11} hasta L_{1n} . L_{2i} (dB) niveles de presión sonora medidos en el interior del módulo desde L_{21} hasta L_{2n} .

El tiempo de reverberación promedio (T_r) se calculó de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_{ri} \quad (4)$$

donde T_{ri} (dB) son los tiempos de reverberación medidos desde T_{r1} hasta T_{rn} .

El cálculo de la diferencia de niveles estandarizada (D_{nT}) y del índice de reducción sonora aparente (R_i) para cada frecuencia central, fue de acuerdo a la ecuación:

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{T_r}{T_0} \right) \quad (5)$$

$$R_i = L_1 - L_2 + 10 \log \left(\frac{S}{A} \right) - 1,5 \quad (6)$$

donde S es el área del elemento en ensayo y A es el área de absorción sonora equivalente del local de recepción. El tiempo de reverberación de referencia es $T_0 = 0,5$ s.

El término de adaptación al espectro (C_j) es el valor en decibeles que se añade al valor de las magnitudes globales para tener en cuenta las características de un espectro de ruido particular, se calcula a partir de:

$$C_j = X_{Aj} - X_W \quad (7)$$

$$X_{Aj} = -10 \log \sum_{i,j=1}^n 10^{L_{ij} - X_i} \quad (8)$$

donde:

j Es el índice de los espectros sonoros n° 1 y n° 2 (ver Tabla 1)

X_W El valor del índice global calculado a partir de los valores D_{nT} y R_i

Valor que se calcula a partir de los niveles L_{ij} a la frecuencia i para el espectro j (Tabla 1), i el índice para la ubicación de los espectros por bandas de tercios de octava de 100 Hz a 3.150 Hz

Tabla 1
Espectros de nivel sonoro para calcular los términos de adaptación

Frecuencia (Hz)	Niveles sonoros L_{ij}	
	Espectro n° 1 Para calcular C Tercio de octava	Espectro n° 2 Para calcular C_r Tercio de octava
100	-29	-20
125	-26	-20
160	-23	-18
200	-21	-16
250	-19	-15
315	-17	-14
400	-15	-13
500	-13	-12
630	-12	-11
800	-11	-9
1000	-10	-8
1250	-9	-9
1600	-9	-10
2000	-9	-11
2500	-9	-13
3150	-9	-15

Fuente: Norma Española UNE-EN ISO 717-1 [8].

Es el índice de reducción sonora aparente promedio (R_i) o la diferencia estandarizada de nivel sonoro (D_{nT}) a la frecuencia de medida i dada con una precisión de 0,1 dB.

El término de adaptación C_j podría calcularse considerando una de las dos siguientes condiciones:

C Cuando se calcule con el espectro sonoro n° 1 Tabla 1 (ruido rosado con ponderación A, que es nuestro caso);

C_r Cuando se calcule con el espectro sonoro n° 2 Tabla 1 (ruido de tráfico con ponderación A)

Los espectros de la mayor parte de las fuentes de ruido interior y exterior preponderantes caen en los rangos de los espectros n° 1 y n° 2, por tanto los términos de adaptación espectral C y C_r deben

usarse para caracterizar el aislamiento acústico respecto a muchos tipos de ruido (Tabla 1).

3. Resultados de ensayos acústicos

Se realizaron tres ensayos acústicos in situ, en la Figura 2 y Tabla 2 se observan los diferentes materiales utilizados en cada uno de ellos. Se varió el espesor y condición seca o húmeda del material ecológico sustrato de fibra de coco para determinar su aislamiento acústico; para ello se midieron los niveles de ruido de fondo exterior e interior del módulo. Se calcularon los valores promedio energético (L_1 y L_2) por bandas de frecuencia central y el tiempo de reverberación promedio (T_r).

La diferencia de nivel estandarizada (D_{nr}) se calculó considerando las alturas de 1,50 m y 2 m, por bandas de frecuencia central de un 1/3 de octava. Para determinar el aislamiento acústico de cada ensayo se calcularon los promedios de la diferencia de niveles estandarizada (D_{nr}) y el índice de reducción sonora aparente (R_i), al igual que sus valores globales D_{nrW} y R_{iW} . Los resultados son mostrados desde la Figura 6 hasta la 10.

4. Discusión de resultados

Analizando el comportamiento acústico del prototipo de techo en la condición seca, con la interacción de una emisión sonora de 93,2 dB, se determinó que: (a) el techo base con su película protectora (Ensayo 1) tiene un valor global R_{iw} de 28 dB, (b) al adicionarle a éste el material ecológico propuesto (sustrato de fibra y pelusa de coco) de 10 cm de espesor se incrementó el aislamiento a 42 dB y (c) con un espesor de 20 cm se incrementó a 44 dB.

Al sembrar la vegetación *Aloe barbadensis* (sábila) sobre el sustrato de 10 cm no se incrementó el aislamiento (Figura 11).

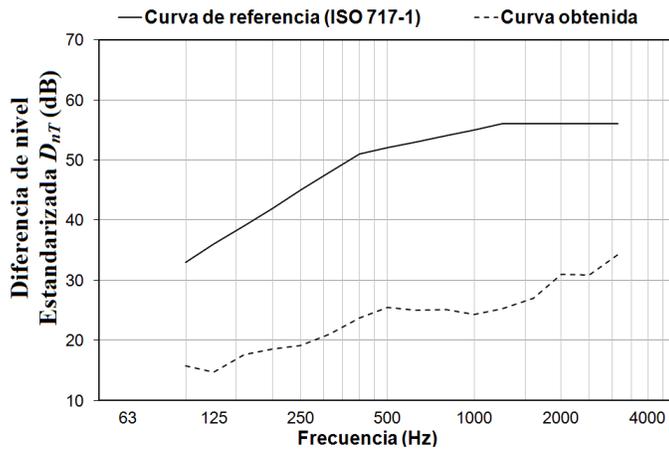
La mayor contribución fue la del sustrato, como se muestra en la Figura 12 donde se compara la diferencia de nivel estandarizada para ambos espesores, observándose que a medida que se incrementa el espesor aumenta el aislamiento, lo cual es visible a partir de los 200 Hz.

Comparando el valor global R_i del sustrato de 20 cm de espesor en las condiciones seca y húmeda, se observa que aísla 44 dB y 41 dB respectivamente, concluyéndose que el aislamiento disminuye cuando aumenta la humedad del sus-

Tabla 2
Ensayos acústicos, para distintas configuraciones de techo

Ensayos	Descripción	Espesor	Condición	Fotos
E1	Techo base con película de polietileno (protector)			
E2	Techo base con película de polietileno (protector)			
	Pelusa de coco (drenaje)	10 cm	E2.1 Seco	
	sustrato fibra de coco	20 cm	E2.2 Seco E2.3 Húmedo	
E3	Techo base con película de polietileno (protector) pelusa de coco (drenaje) sustrato fibra de coco seco 10cm <i>Aloe barbadensis</i> (Sábila).	10 cm	Seco	

Fuente: Elaboración propia.



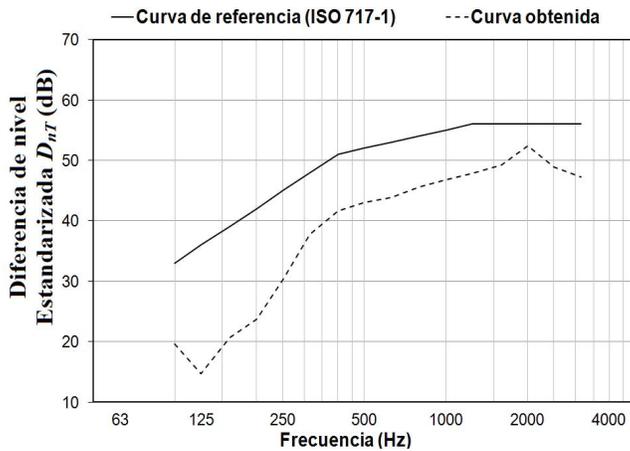
Fecha: 22/07/2011
 Temperatura= 37,21°C
 Humedad= 65%

$$D_{nTW} = 27(-1;-3)$$

$$R_{iW} = 28(-1;-3)$$

Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Configuración E1, techo base.



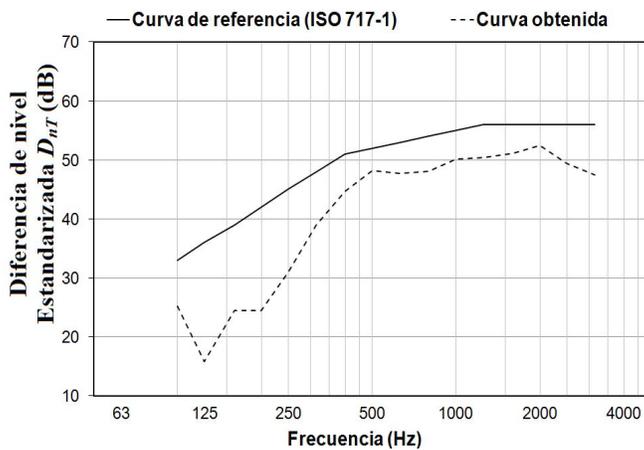
Fecha: 21/07/2011
 Temperatura= 37,06°C
 Humedad= 70%

$$D_{nTW} = 41(-4;-10)$$

$$R_{iW} = 42(-4;-10)$$

Fuente: Elaboración propia.

Figura 7. Configuración E2.1 sustrato seco 10 cm.



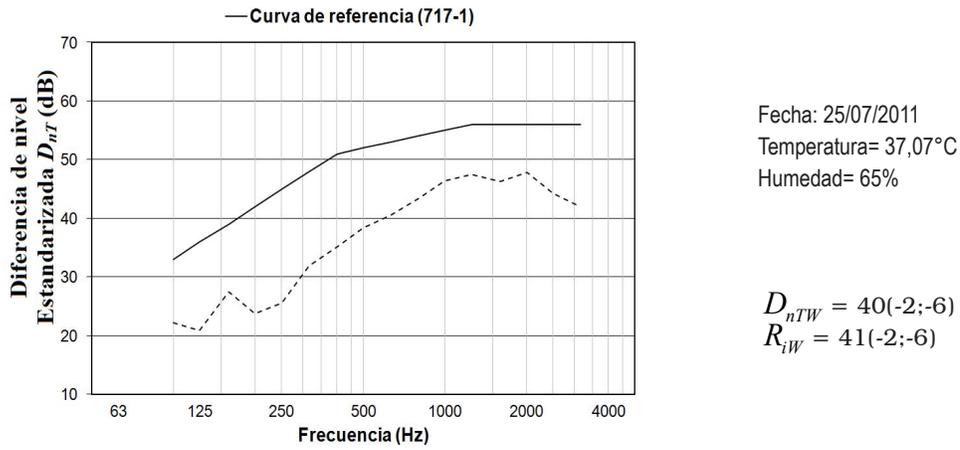
Fecha: 22/07/2011
 Temperatura= 37,21°C
 Humedad= 65%

$$D_{nTW} = 43(-4;-10)$$

$$R_{iW} = 44(-4;-10)$$

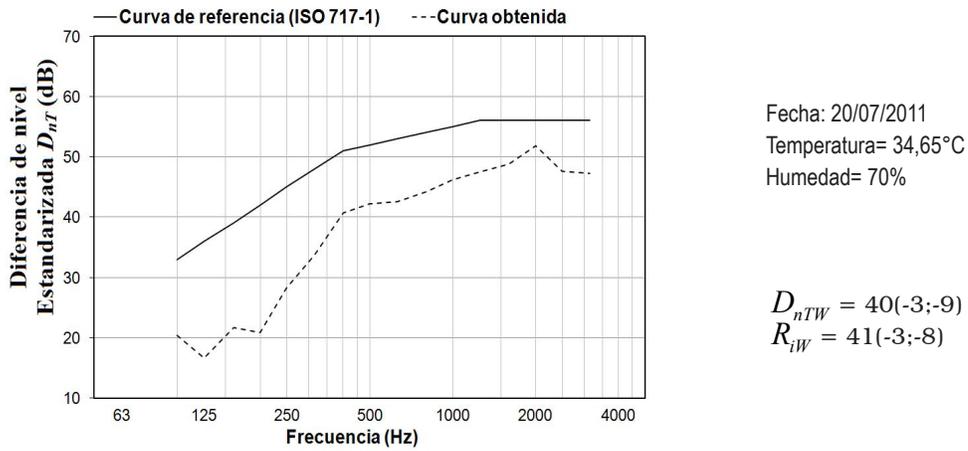
Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Configuración E2.2 sustrato seco 20 cm.



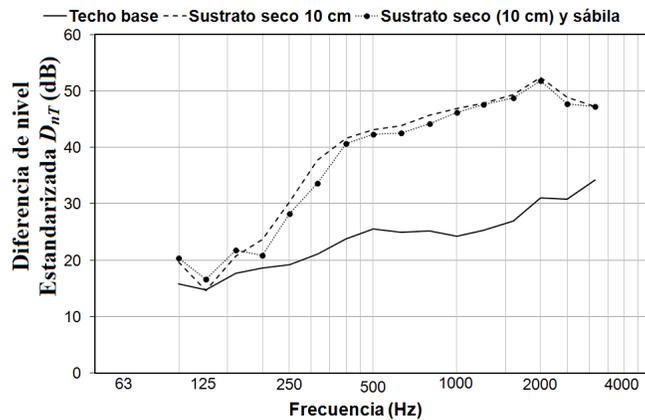
Fuente: Elaboración propia.

Figura 9. Configuración E2.3 sustrato húmedo 20 cm.



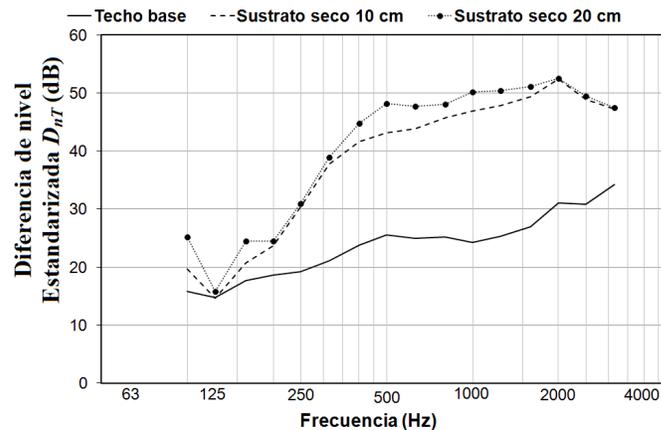
Fuente: Elaboración propia.

Figura 10. Configuración E 3 sustrato seco 10 cm con *Aloe barbadensis*.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 11. Gráfico comparativo Diferencia de Niveles Estandarizada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 12. Gráfico Diferencia de Niveles Estandarizada.

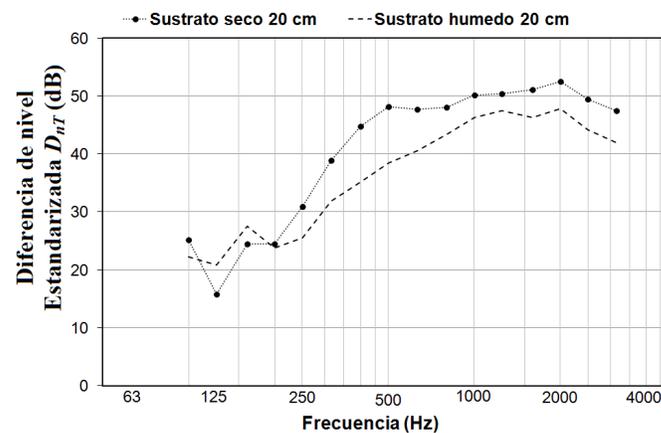
trato. En la Figura 13 se compara la diferencia de nivel estandarizada para ambas condiciones donde a medida que aumenta la frecuencia del sonido mejora el aislamiento del techo.

5. Conclusiones

Se diseñó un sistema de aislamiento acústico en techo utilizando algunos materiales ecológicos propios de la región tropical, entre ellos el sustrato de fibra de coco, al cual se le varió el espesor y la condición. Para un nivel de presión sonora exterior (L_{Aeq}) de 93,2 dB, la configuración de techo con un espesor de fibra de coco de 10 cm y en condición seca, presentó un aislamiento (R_i) de 42 dB, y la cubierta vegetal viva no aportó aislamiento cuantificable. Al incrementarse el espesor de la fibra de coco a 20 cm sin la especie vegetal,

el aislamiento (R_i) fue de 44 dB en condición seca y en condición húmeda fue de 41 dB. Se detectó que al duplicar de 10 cm a 20 cm el espesor de la segunda capa conformada por la fibra de coco, el aislamiento aumentó en 2 dB. Cualitativamente la ley de masa establece que la pérdida de transmisión sonora aumenta al incrementarse la masa y la frecuencia. Al variar la condición de la fibra de coco de seca a húmeda con un espesor de 20 cm, el aislamiento disminuyó en 3 dB, debido a que la velocidad del sonido se incrementa en un medio húmedo.

No existen normas para realizar ensayos de aislamiento acústico en techos, por lo tanto es necesario estudiar cuál debe ser la posición más representativa de la fuente sonora, este aspecto debe contemplar la distancia a la muestra y el



Fuente: Elaboración propia.

Figura 13. Gráfico comparativo Diferencia de Niveles Estandarizada.

ángulo de incidencia, de manera que minimice la pérdida de la energía sonora. La Norma Española ISO 140-5 para fachadas establece que la distancia entre la fuente y el centro de la muestra sea como mínimo 7 m y un ángulo de incidencia sonora de $45^\circ \pm 5^\circ$. En esta investigación, la distancia utilizada fue de 6 m y el ángulo de 59° . Se está realizando un estudio en distintas posiciones de la fuente sonora, para este tipo de ensayos con el fin de establecer cuál es la geometría más representativa para la ubicación del altavoz.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico, por la Facultad de Arquitectura y Diseño y por el Vicerrectorado Académico de la Universidad del Zulia, así como también por el Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. Se agradece la asesoría del Laboratorio de Ensayos Acústicos (LABENAC) de la Universidad Politécnica de Madrid, del Laboratorio de Acústica de la Pontificia Universidad del Perú y del Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia. Se le agradece al Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura y Diseño de LUZ por facilitarnos las instalaciones para realizar los estudios experimentales.

Referencias bibliográficas

1. Recuero, M.: "Acústica Arquitectónica Aplicada", Editorial Paraninfo, Madrid, 1999.
2. Arau, H.: "ABC de la Acústica Arquitectónica", Ediciones CEAC, España, 1999.
3. Norma Venezolana Covenin N° 1433. Determinación del ruido emitido por vehículos de motor, 1981.
4. Norma Española UNE-EN ISO 717-1, Evaluación del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción, Parte 1 Aislamiento a ruido aéreo, 1997.
5. Norma Española UNE EN ISO 140-5, Medición del aislamiento acústico en los edificios y de los elementos de construcción, Parte 5 Mediciones in situ del aislamiento acústico a ruido aéreo de elementos de fachadas y de fachadas, 1999.
6. Cook K.: "Sound insulation of domestic roofing systems: part 1". Applied Acoustics, Vol. 13, N° 2 (1980) 109-120.
7. Cook K.: "Sound insulation of domestic roofing systems: part 2". Applied Acoustics, Vol. 13, N° 3 (1980) 202-210.
8. Cook K.: "Sound insulation of domestic roofing systems: part 3". Applied Acoustics, Vol. 13, N° 4 (1980) 313-329.
9. Sánchez J., Pedrero A. y Gómez J.: "Influence of loudspeaker directivity and measurement geometry on direct acoustic levels over façades for acoustic insulation tests with the International Standard ISO 140-5". Applied Acoustics, Vol. 73, N° 4 (2012) 440-453.
10. Tadeu A., António J. y Mateus D.: "Sound insulation provided by single and double panel walls –a comparison of analytical solutions versus experimental results". Applied Acoustics, Vol. 65, N° 1 (2004) 15-29.
11. Colegio oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de la Región de Murcia: "Guía de Materiales para una Construcción Sostenibles", Edita A, Murcia, 2008.
12. Dinsdale S., Pearen B. y Wilson C.: "Feasibility Study for Green Roof Application on Queen's University Campus". In <http://www.queensu.ca/pps/reports/greenroof.pdf>.

Recibido el 24 de Septiembre de 2012

En forma revisada el 23 de Septiembre de 2013