



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Propuesta para el control de ruido
ambiental en función de frecuencias de
emisión mediante barreras vegetales

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera civil

P R E S E N T A

Naftali López Jiménez

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres, por el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de toda mi vida. Por permitirme soñar y dejarme volar muy alto. Gracias por estar siempre a mi lado y nunca dejar que me rinda tan fácilmente. Los amo infinitamente.

A mi hermano, por ser mi pequeño gran motor. Desde que llegaste a mi vida siempre me motivaste a dar lo mejor de mí, no sólo para que estuvieras orgulloso de tu hermana mayor, sino que también, para que tuvieras un buen ejemplo a seguir. Gracias por haber llegado a mi vida.

A mi familia y amigos que estuvieron motivándome y alentándome a seguir adelante. Los quiero mucho.

*¿Qué es la vida? Un frenesí.
¿Qué es la vida? Una ilusión,
Una sombra, una ficción,
y el mayor bien es pequeño:
que toda la vida es sueño,
y los sueños, sueños son.*

La vida es sueño, Pedro Calderón de la Barca

RESUMEN

En los últimos años, el ruido ambiental se ha convertido en una problemática dentro de las ciudades. En los años 1960, en algunos países europeos, se empezó a proponer soluciones que atenuaran los niveles de ruido ambiental. Una de las soluciones más comunes es el uso de barreras acústicas, las cuales están construidas de diferentes materiales como: madera, acero, concreto entre otros. Sin embargo, el uso de estas barreras no ha sido aceptado totalmente por el ser humano, por lo que se ha emprendido en la búsqueda de nuevas alternativas para el abatimiento del ruido ambiental. Una de estas alternativas es el uso de vegetación como barrera acústica. En esta tesis, se busca encontrar una barrera vegetal que sea la más eficiente en cuanto atenuación de ruido en función de frecuencias de emisión.

ABSTRACT

In the last years, environmental noise has become a huge problem in cities. During the 1960's, European countries began to propose solutions to combat environmental noise. One of the most popular solutions are acoustic barriers. These acoustic barriers are built out of different materials such as timber, steel, concrete and others. However, the use of these barriers has not been completely accepted by human beings, causing an interest in the search of new alternatives for environmental noise abatement. One of these alternatives is the use of vegetation as an acoustic barrier. This thesis seeks for a green acoustic barrier that can provide a mayor noise mitigation according to different sound frequencies.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
1. TEORÍA ACÚSTICA	3
1.1 ¿QUÉ ES EL SONIDO?	3
1.2 PROPAGACIÓN DE UNA ONDA SONORA	8
1.3 PRESIÓN SONORA Y NIVEL DE PRESIÓN SONORA	18
1.4 POTENCIA ACÚSTICA Y NIVEL DE POTENCIA SONORA	19
1.5 INTENSIDAD ACÚSTICA Y NIVEL DE INTENSIDAD ACÚSTICA	20
1.6 ¿QUÉ ES EL RUIDO?	21
2. IMPACTOS DEL RUIDO EN EL HUMANO	23
2.1 EL OÍDO HUMANO	23
2.2 DAÑOS A LA SALUD GENERADOS POR EL RUIDO AMBIENTAL	24
3. MITIGACIÓN DE RUIDO AMBIENTAL	27
3.1 CONTROL DE RUIDO MEDIANTE USO DE NORMATIVAS Y REGLAMENTOS	27
3.2 MAPAS DE RUIDO	28
3.3 PAISAJE SONORO	31
3.4 MEDIDAS TRADICIONALES DE CONTROL DE RUIDO AMBIENTAL	38
3.5 BARRERAS ACÚSTICAS	39
4. USO DE VEGETACIÓN PARA LA ATENUACIÓN DE RUIDO	47
4.1 COMPORTAMIENTO DEL SONIDO EN VEGETACIÓN	47
4.2 ABSORCIÓN DEL RUIDO EN VEGETACIÓN	47
4.3 REDISTRIBUCIÓN SONORA	49
4.4 ARREGLO DE VEGETACIÓN A PIE DE CARRETERA	53
4.5 OTRAS VENTAJAS DE LA PRESENCIA DE ÁREAS VERDES EN CIUDADES	55
5. METODOLOGÍA	66
5.1 ÁREAS VERDES DE CIUDAD UNIVERSITARIA	67

5.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN	70
5.3 PLAN DE TRABAJO	70
5.4 TRABAJO DE CAMPO	75
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
6.1 ATENUACIÓN CON RESPECTO A LA FRECUENCIA	84
6.2 ATENUACIÓN RELATIVA CON RESPECTO A LA DISTANCIA	88
6.3 ZONA DE SOMBRA ACÚSTICA DE LOS PUNTOS DE MUESTREO	90
6.4 COMPARACIÓN DE NIVELES DE ATENUACIÓN ENTRE VEGETACIÓN Y OTROS MATERIALES	95
6.5 BARRERAS VERDES ÓPTIMAS PARA FRECUENCIAS BAJAS	101
7. CONCLUSIONES	102
BIBLIOGRAFÍA	105

Índice de figuras

FIGURA 1.1 SONIDO PERIÓDICO SIMPLE (CARRIÓN ISBERT, 1998)	3
FIGURA 1.2 SONIDO TRANSITORIO (CARRIÓN ISBERT, 1998)	4
FIGURA 1.3. SONIDO PERIÓDICO COMPLEJO (CARRIÓN ISBERT, 1998).....	4
FIGURA 1.4. SONIDO ALEATORIO (CARRIÓN ISBERT, 1998)	4
FIGURA 1.5. PROPAGACIÓN DEL SONIDO.....	5
FIGURA 1.6. ELEMENTOS DE UNA ONDA SONORA (MURPHY & KING, 2014)	7
FIGURA 1.7 PROPAGACIÓN DE UNA ONDA SONORA EN UN ESPACIO LIBRE (CARRIÓN ISBERT, 1998)	8
FIGURA 1.8. BALANCE ENERGÉTICO DE UNA ONDA SONORA QUE CHOCA CON UN OBSTÁCULO (AVILÉS LÓPEZ & PERERA MARTÍN, 2017) ..	9
FIGURA 1.9. COEFICIENTES DE ABSORCIÓN ACÚSTICA DE DIFERENTES MATERIALES.....	10
FIGURA 1.10. CÁMARA REVERBERANTE	11
FIGURA 1.11. ESQUEMA DE UNA CÁMARA REVERBERANTE (AZKORRA ET AL., 2015)	11
FIGURA 1.12. TUBO DE IMPEDANCIA.....	12
FIGURA 1.13 COMPONENTES DE UN TUBO DE IMPEDANCIA.	13
FIGURA 1.14 REFLEXIÓN ESPECULAR Y REFLECTIVA.....	14
FIGURA 1.15 CÁMARA SEMI ANECOICA.....	15
FIGURA 1.16. PERFIL Y DIAGRAMA DE DIFUSIÓN DE UN DIFUSOR MLS (CARRIÓN ISBERT, 1998)	17
FIGURA 1.17. REFLEXIONES Y REFRACCIONES DE UNA ONDA INCIDENTE A UN OBSTÁCULO (AVILÉS LÓPEZ & PERERA MARTÍN, 2017)	17
FIGURA 1.18 DIFRACCIÓN DE ONDA CON ABERTURA SIMILAR A LA LONGITUD DE ONDA.	18
FIGURA 1.19 ABERTURA DE MAYOR LONGITUD A LA ONDA SONORA	18
FIGURA 2.1 EL OÍDO HUMANO (HERNÁNDEZ CORONA, 2014).....	23
FIGURA 3.1 MAPA DE RUIDO (KO, CHANG, & LEE, 2011)	29
FIGURA 3.2. MAPA ESTRATÉGICO DE RUIDO (VOGIATZIS & REMY, 2014)	29
FIGURA 3.3. EJEMPLO DE ORGANIZACIÓN POR UMEs (AMBIENTE, DE, & EVALUACION, N.D.)	30
FIGURA 3.4. ETAPAS DEL DESARROLLO DE UN AMBIENTE SONORO (BROWN & MUHAR, 2004)	34
FIGURA 3.5. ELEMENTOS DE COMPOSICIÓN DE UN PAISAJE SONORO (BROWN & MUHAR, 2004)	35
FIGURA 3.6. COMPARACIÓN DE PREFERENCIAS DE SONIDO (LIU & KANG, 2016)	36
FIGURA 3.7. DEFINICIÓN DE PAISAJE SONORO DE ACUERDO CON LA CONCIENCIA HUMANA (LIU & KANG, 2016)	37
FIGURA 3.8. ONDA SONORA INCIDENTE A UNA BARRERA ACÚSTICA (FLORES, 1990).....	40
FIGURA 3.9. OBTENCIÓN DEL CAMINO REFERENCIAL Δ	40
FIGURA 3.10. LÍNEA VISUAL PARA Δ	41
FIGURA 3.11. GRÁFICA DE ATENUACIÓN ACÚSTICA (FLORES, 1990)	42
FIGURA 3.12. OBTENCIÓN DE LA ALTURA EFECTIVA H_E . FIGURA 3.13. OBTENCIÓN DEL ÁNGULO DE PANTALLA Θ	43
FIGURA 3.14. GRÁFICA DE ATENUACIÓN ACÚSTICA DE UNA BARRERA, TOMANDO EN CUENTA LA ALTURA EFECTIVA DE LA BARRERA (FLORES, 1990).....	43
FIGURA 3.15. REFLEXIÓN SONORA EN BARRERAS REFLEXIVAS (HANS, 2016)	44
FIGURA 3.16. BARRERAS DE LÁMINA DE ALUMINIO (IZQ.) Y DE CONCRETO (DER) (ENGLISH, 2001)	44
FIGURA 3.17. BARRERAS DE MADERA (IZQ) Y DE LÁMINA DE ACERO (DER). (ENGLISH, 2001)	45
FIGURA 3.18. CORTE TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL DE UNA BARRERA REACTIVA (ENGLISH, 2001).....	46
FIGURA 4.1. INTERACCIÓN DIRECTA ENTRE LAS ONDAS SONORAS Y LA VEGETACIÓN (NILSSON ET AL., 2014)	47
FIGURA 4.2 PÉRDIDA DE ENERGÍA DE LAS ONDAS SONORAS DEBIDO A LA TRANSFERENCIA DE CALOR.	48
FIGURA 4.3. COEFICIENTES DE ABSORCIÓN DE ALGUNAS PLANTAS A DIFERENTES FRECUENCIAS (NILSSON ET AL., 2014)	49

FIGURA 4.4. DIAGRAMA DE RESPUESTA POLAR PARA BREZO CON SONIDO INCIDENTE A 45° (SMYRNOVA ET AL., 2012).....	53
FIGURA 4.5. DIAGRAMA DE RESPUESTA POLAR PARA PENSAMIENTO CON SONIDO INCIDENTE A 90° (SMYRNOVA ET AL., 2012)	53
FIGURA 4.6. CRISTAL SÓNICO 2D (ZAHN ET AL., 2015)	54
FIGURA 4.7. ARREGLO GEOMÉTRICO DE CADA UNO DE LOS CRISTALES SÓNICOS CREADOS CON ÁRBOLES (MARTÍNEZ-SALA ET AL., 2006) 54	
FIGURA 4.8. ATENUACIÓN CON RESPECTO AL DIÁMETRO DEL TRONCO (VAN RENTERGHEM, 2014)	55
FIGURA 4.9. DISEÑO DE BARRERAS PARA MITIGAR GASES CONTAMINANTES (TONG ET AL., 2016).....	58
FIGURA 4.10. EFECTO ISLA DE CALOR (GAGO ET AL., 2013)	60
FIGURA 4.11. TEMPERATURAS MÁXIMAS EN LA CIUDAD DE MÉXICO, EN LA ÉPOCA DE LOS 60 (JÁUREGUI, 1974)	61
FIGURA 4.12. TEMPERATURA MÍNIMA EN LA CIUDAD DE MÉXICO (JÁUREGUI, 1974).....	62
FIGURA 4.13 BARRERA DE DIFERENTES TIPOS DE MATERIALES (HONG & JEON, 2014)	65
FIGURA 4.14 PREFERENCIA COMPARADA CON PRECONCEPCIÓN DE ATENUACIÓN DE RUIDO (HONG & JEON, 2014)	65
FIGURA 5.1 EVOLUCIÓN DE LA REPSA (ZAMBRANO ET AL.,2016).....	67
FIGURA 5.2 REDUCCIÓN DEL PEDREGAL Y ESPACIOS ABIERTOS (ZAMBRANO ET AL., 2016).....	68
FIGURA 5.3. PUNTOS POTENCIALES DE MUESTREO	69
FIGURA 5.4 DIAGRAMA DE ACOMODO DEL EQUIPO DE MEDICIÓN EN CAMPO	72
FIGURA 5.5. PROPUESTA DE ACOMODO DEL EQUIPO DE MEDICIÓN PARA DIFERENTES ALTURAS	72
FIGURA 5.6. LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO.	76
FIGURA 5.7 EQUIPO PARA REALIZACIÓN DE MEDICIONES.	80
FIGURA 5.8. ACOMODO DE SONÓMETROS EN PUNTO 2 A UNA DISTANCIA DE 5 M.....	81
FIGURA 5.9. FUENTE DE SONIDO INCIDIENDO SOBRE PUNTO 1 DE ESTUDIO	82
FIGURA 5.10. CALIBRACIÓN DE SONÓMETROS	82
FIGURA 5.11. FUENTE DE SONIDO SIN BARRERA VEGETAL EN PUNTO 2.....	83
FIGURA 5.12 FUENTE DE SONIDO SIN BARRERA VEGETAL EN PUNTO 3.....	83
FIGURA 6.1 PORCENTAJE DE ATENUACIÓN/FRECUENCIA A 5 M.....	85
FIGURA 6.2. GRÁFICA %ATENUACIÓN/FRECUENCIA A 10 M DE DISTANCIA.....	87
FIGURA 6.3. GRÁFICA %ATENUACIÓN CON RESPECTO A LA DISTANCIA.....	89
FIGURA 6.4. ZONA DE SOMBRA REGISTRADA POR LOS SONÓMETROS EN LA BARRERA DE JUNÍPERO.....	91
FIGURA 6.5. VISTA AÉREA DE LA ZONA DE SOMBRA DEL JUNÍPERO	91
FIGURA 6.6. ZONA DE SOMBRA REGISTRADA POR LOS SONÓMETROS EN LA BARRERA DE BUGAMBILIA.....	92
FIGURA 6.7. VISTA AÉREA DE LA ZONA DE SOMBRA DE LA BUGAMBILIA.....	93
FIGURA 6.8. ZONA DE SOMBRA REGISTRADA POR LOS SONÓMETROS EN LA BARRERA DE CACTÁCEA.....	94
FIGURA 6.9. VISTA AÉREA DE LA ZONA DE SOMBRA DE LA CACTÁCEA.	94
FIGURA 6.10. IL DE BARRERAS CONSTRUIDAS DE TABIQUE Y PANELES DE CONCRETO (HALIM ET AL., 2015).....	98
FIGURA 6.11. BARRERAS DE CONCRETO CON DIFERENTE ESTRUCTURA SUPERIOR (HAAN & KIM, 2016)	98
FIGURA 6.12. IL DE BARRERAS DE CONCRETO CON DIFERENTE ESTRUCTURA SUPERIOR (HAAN & KIM, 2016).....	99
FIGURA 6.13 BARRERAS DE CONCRETO CON DIFERENTES DIMENSIONES (HAAN & KIM, 2016)	99
FIGURA 6.14 IL DE BARRERAS DE CONCRETO CON DIFERENTES ALTURAS (HAAN & KIM, 2016)	100
FIGURA 6.15. ESPECTROGRAMA DE UN VEHÍCULO (KHUNARSAL, LURSINSAP, & RAICHARON, 2013)	101
FIGURA 6.16. ESPECTROGRAMA DE DIFERENTES MODELOS DE VEHÍCULOS	102

Introducción

Frecuentemente se ha pensado que el ruido ambiental es una problemática del siglo XXI, especialmente en grandes urbes. Sin embargo, esta ha sido una problemática que algunas civilizaciones antiguas trataron de combatir.

Los romanos ya habían identificado que los sonidos generados por las ruedas de las carretas al pasar por calles empedradas causaban cierta molestia por lo que, elaboraron un decreto que establecía la prohibición de tránsito de carretas en Roma durante la noche. Sin embargo, Julio Cesar decidió pasar por alto dicho decreto y obligó a que los proveedores de bienes transitaran durante la noche.

La caída del Imperio romano ocasionó un desinterés en encontrar soluciones para reducir el ruido ambiental. Fue hasta mediados del siglo XX que se identificó que el ruido ambiental podía ser una problemática a futuro. Por lo que, en países europeos, especialmente en el Reino Unido, se empezaron a generar propuestas para la mitigación de ruido ambiental.

Con el transcurso del tiempo y con el crecimiento de las grandes ciudades esta problemática fue en aumento. Solamente en el año 2016 en la Ciudad de México se registraron más de 2,400 quejas por contaminación auditiva. Esto ocasionó que este tipo de denuncias ocuparan el tercer lugar de principales acusaciones ciudadanas, según información de la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT).

A pesar de que en el país se cuentan con normas que establecen los límites máximos permisibles para la emisión de ruido, estas reglas no castigan a quienes emiten mayores niveles acústicos. Además, tampoco se proponen soluciones para combatir el ruido ambiental.

Por ello, en este trabajo de investigación se propone el uso de barreras verdes como una posible opción para la atenuación de ruido ambiental, especialmente a lo largo de carreteras. Pero, para poder conocer si este tipo de barreras es eficiente o no, fue necesario estresar a diversos tipos de barreras vegetales con frecuencias diferentes, para después obtener porcentajes de atenuación acústica y pérdidas de inserción de ruido (IL) para poder compararlos con otro tipo de barreras acústicas.

Para este trabajo se escogieron tres tipos de barreras diferentes: junípero, bugambilia y sábila. Esto con el objetivo de identificar las características en las cuales se presenta la mayor mitigación de ruido. Los criterios por los cuales que escogieron estas barreras fueron: diversidad de especie y accesibilidad.

Con ayuda de un generador de frecuencias conectado a una bocina, se amplificaron frecuencias entre los 100 y 800 Hz. Esto debido a que el ruido de los vehículos se encuentra en este intervalo de frecuencias.

Con ayuda de sonómetros se midieron los niveles de presión acústica generados por la bocina. Estas mediciones se realizaron con y sin presencia de barrera, a distancias de 5 y 10 m, además de mediciones a alturas diferentes, dependiendo de la barrera. Esto con el objetivo de obtener los porcentajes de atenuación acústica, pérdida de inserción de ruido e identificar la zona de sombra acústica.

El uso de estas barreras vegetales lograría disminuir el ruido ambiental hasta en un 12%, lo cual implica una pérdida de inserción de ruido (IL) de hasta 9 dB, además de que se acerca al rendimiento de una barrera de concreto; material que es considerado como el más efectivo para la atenuación de ruido ambiental.

También se logró identificar la barrera verde que puede ser potencialmente efectiva para atenuar niveles de presión acústica a bajas frecuencias. Esto es de gran importancia ya que una de las principales fuentes generadoras de ruido ambiental es precisamente el ruido generado por el flujo vehicular.

Objetivo general

Encontrar la barrera verde que permita obtener mayor atenuación de ruido ambiental mediante la emisión de ruido a diferentes frecuencias sobre diversos tipos de vegetación. Además de identificar las características físicas de la barrera verde que permiten lograr dicha atenuación.

Objetivos específicos

1. Identificar las características físicas de cada una de las barreras.
2. Obtener el porcentaje de atenuación con respecto a la frecuencia para identificar la frecuencia a la cual se obtiene la mayor mitigación de ruido.
3. Calcular la atenuación relativa con respecto a la distancia e identificar la zona de sombra generada por cada una de las barreras.
4. Comparar las pérdidas de inserción acústica con valores teóricos de barreras de concreto y valores mínimos de eficiencia, para establecer si las barreras verdes son eficientes o no.
5. Identificar la barrera verde que permita atenuar las frecuencias bajas generadas por vehículos.

1. Teoría acústica

1.1 ¿Qué es el sonido?

Definir el sonido puede llegar a ser algo muy complejo, ya que se cuentan con diferentes definiciones del mismo. Una de las definiciones de sonido es: “*sensación auditiva producida por una vibración de carácter mecánico que se propaga a través de un medio elástico y denso*” (Isbert, 1998,pág.27). El sonido, también puede definirse como una vibración mecánica, la cual viaja a través de un medio elástico, y que tiene la característica de producir una sensación sonora. Si dicha vibración mecánica no es percibida o no produce una sensación sonora, entonces no se le puede considerar como sonido.

Tipos de sonido

El sonido es clasificado en dos categorías:

- **Deterministas:** los cuales pueden ser representados a través de una expresión matemática. Dicha expresión representa la manera en la que varía la presión sonora con respecto al tiempo.

Dentro de los sonidos deterministas, se encuentran:

- El sonido periódico simple, o sonido puro (ver figura 1.1), el cual tiene la característica de tener una sola frecuencia constante. Este tipo de sonido solamente se puede recrear en un laboratorio, ya que no se encuentra de manera natural.

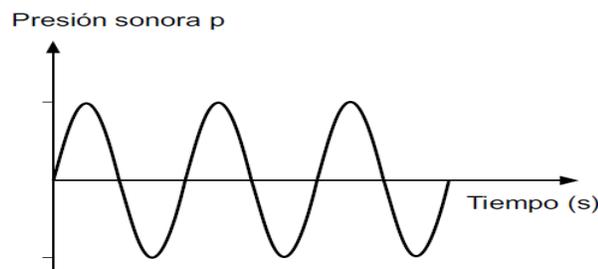


Figura 1.1 Sonido periódico simple (Carrión Isbert, 1998)

- **Sonido transitorio** tiene la característica de ser repentino y de poca duración. Este tipo de sonidos son característicos de fuertes impactos o explosiones. El comportamiento del sonido transitorio se muestra en la figura 1.2.

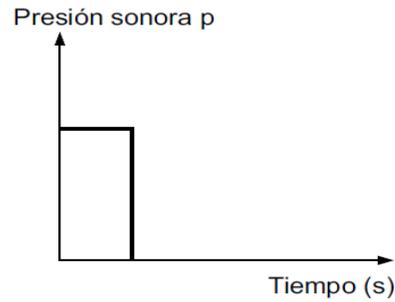


Figura 1.2 Sonido transitorio (Carrión Isbert, 1998)

- Sonido periódico complejo se presenta en el momento de tocar un instrumento musical. Este tipo de sonido cuenta con una frecuencia de origen y por frecuencias que son múltiplos de la frecuencia de origen (ver figura 1.3).

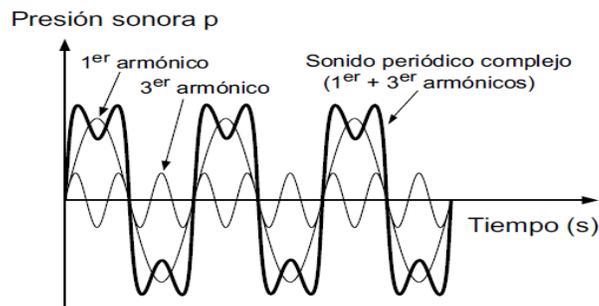


Figura 1.3. Sonido periódico complejo (Carrión Isbert, 1998)

- Aleatorios: las vibraciones sonoras se presentan sin patrón alguno y la única manera de poder representarlos es a través de métodos estadísticos. Generalmente, los sonidos aleatorios son considerados como ruido, ya que se presentan en frecuencias diferentes, tal como se muestra en la figura 1.4.

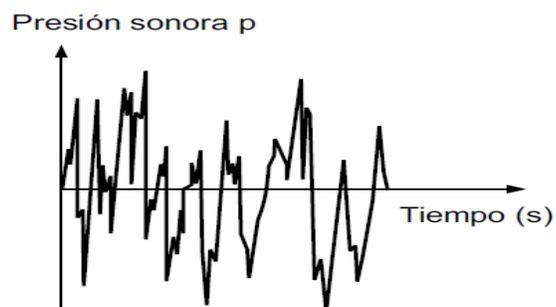


Figura 1.4. Sonido aleatorio (Carrión Isbert, 1998)

Propagación del sonido

Para que un sonido pueda ser originado, son necesarios tres elementos: la fuente o foco, la fuerza de inercia y un medio elástico (gaseoso, líquido, sólido). La fuente o foco, es aquel elemento que permite que un sonido se genere, esto puede ser desde una guitarra hasta la hoja de un árbol. La fuerza de inercia es la que consiente a un cuerpo a transferir perturbación a otro cuerpo adyacente. Esta fuerza de inercia está ligada a la densidad del medio por el cual se va a transmitir el sonido. Por último, el medio elástico va a ser el responsable de conducir el sonido desde un punto a otro. En caso de que no se cuente con un medio elástico, las ondas sonoras no se podrán propagar, ya que el sonido no se propaga a través del vacío.

Una vez identificados los elementos necesarios para generar un sonido, es necesario entender el proceso de propagación del mismo. El sonido inicia cuando el foco entra en vibración lo que ocasiona que estas vibraciones se transmitan en las partículas de aire. Lo anterior tiene como consecuencia que las partículas de aire sean perturbadas y a su vez colisionen con otras partículas adyacentes generando así, un momento entre ellas. Una vez que las partículas de aire han colisionado, éstas oscilan alrededor de su posición de equilibrio, tal como se muestra en la figura 1.5.

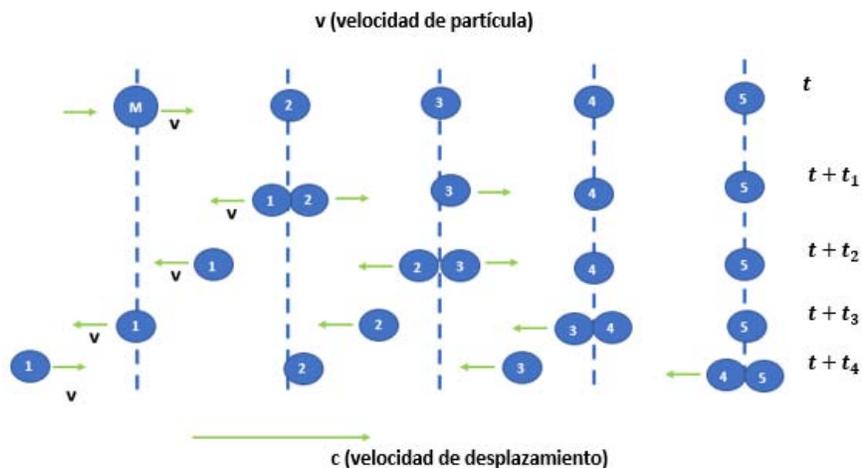


Figura 1.5. Propagación del sonido.
Fuente: Elaboración propia

Velocidad de sonido

La velocidad de sonido puede entenderse como la velocidad a la cual viaja la onda sonora a través de un medio. Para poder obtener esta velocidad, es necesario resolver la ecuación 1:

$$c_t = c_0 + 0.6t \quad (1)$$

En donde:

c_t =velocidad a la cual viaja la onda sonora en m/s

c_0 = velocidad del sonido a 0 °C (331.6 m/s)

t = temperatura °C

Como ya se ha mencionado, una de las características físicas de gran importancia para la propagación del sonido es la densidad, ya que ésta está ligada con la fuerza de inercia con la cual se va a propagar la onda sonora. Muestra de ello es la tabla 1.1, en la cual se puede observar que se tiene mayor velocidad de propagación del sonido en medios sólidos que en medios gaseosos.

Material	Velocidad del sonido, m/s	Densidad, kg/m ³
Aire, seco, sin CO ₂	331.8	1.29
Oxígeno	317	1.43
Hidrógeno	1269	0.0897
Helio	972	0.1785
Agua	1461	1000
Madera	3048-4572	480-800
Cobre	3557	8890
Hierro	4190	7894

Tabla 1.1. Velocidad del ruido en diferentes medios (Hernández Corona, 2014)

Frecuencia

La frecuencia en una onda sonora puede entenderse como el número de veces (oscilaciones) que se repite un fenómeno por unidad de tiempo. La unidad en la que se mide la frecuencia es el hertzio (Hz).

La frecuencia de sonido va a depender del rango acústico en el cual se encuentren las ondas sonoras. Estos rangos acústicos generalmente se clasifican en infrasonidos, audiofrecuencia y ultrasonidos.

Los infrasonidos son aquellos que están por debajo de los 20 Hz, además de que no son percibidos por el ser humano. Aunque el oído humano no puede percibir estas frecuencias, sí se tiene una reacción en presencia de ellas.

Las audiofrecuencias son aquellas que se encuentran entre los 20 y los 20,000 Hz y que pueden ser percibidas por el oído humano. Cabe mencionar que los límites máximos de frecuencia audibles por el ser humano van a depender de la edad y salud del individuo.

Los ultrasonidos tienen la característica de presentarse en frecuencias mayores a los 20,000 Hz además de que se desconoce el límite superior de frecuencia.

Amplitud de onda

La amplitud de onda se puede entender como la variación máxima de la presión que genera una onda sonora. A mayor valor de amplitud, mayor diferencia de presión y mayor la percepción del sonido. La amplitud de onda busca caracterizar la cantidad de energía asociada a la onda sonora (Avilés López & Perera Martín, 2017, pág. 7)

Longitud de onda

La longitud de onda puede definirse como la distancia que recorre una onda sonora en un ciclo completo de vibración. Para poder determinar la longitud de onda, se tiene la expresión 2:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

En donde:

λ = longitud de onda
 c = velocidad de onda
 f = frecuencia

También se puede obtener el valor de la longitud de onda a través de la ecuación 3:

$$\lambda = c T \quad (3)$$

En donde T representa el periodo de onda, el cual puede entenderse como el tiempo que transcurre entre dos puntos diferentes de una onda. El periodo también puede definirse como el recíproco de la frecuencia, tal y como se muestra en la ecuación 4:

$$T = \frac{1}{f} \quad (4)$$

En donde:

T = periodo
 f = frecuencia

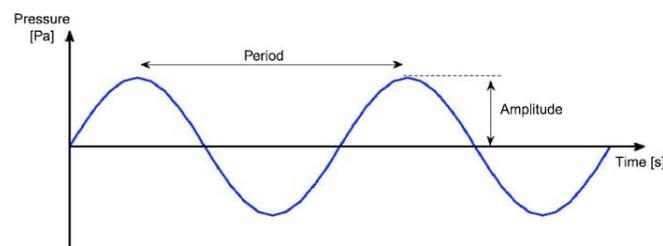


Figura 1.6. Elementos de una onda sonora (Murphy & King, 2014)

1.2 Propagación de una onda sonora

La propagación de una onda sonora se puede presentar de dos maneras, la primera cuando la onda se propaga en un espacio libre, y la segunda se presenta cuando dicha onda se encuentra con algún obstáculo. A continuación, se presentan las características de cada tipo de propagación.

Propagación en un espacio libre

Cuando se tiene propagación de una onda sonora en un espacio libre se tiene presencia de un sonido directo, el cual, tiene la característica de viajar de manera ininterrumpida desde la fuente generadora hasta un punto cualquiera.

Cuando se tiene un sonido directo en un ambiente libre, la energía de la onda sonora se difunde por todas las direcciones, de manera equitativa. Esto implica que, a una distancia cualquiera, el nivel de presión sonora será la misma. A este fenómeno se denomina propagación esférica. Conforme uno se va alejando de la fuente de sonido, los niveles de presión sonora irán disminuyendo, tal y como se muestra en la figura 1.7 (Carrión Isbert, 1998, pág. 48).

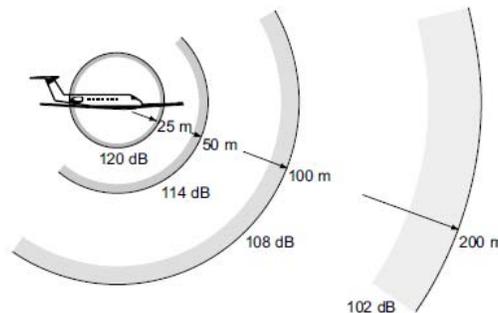


Figura 1.7 Propagación de una onda sonora en un espacio libre (Carrión Isbert, 1998)

Fenómenos asociados a la propagación

Como ya se ha mencionado, la propagación de una onda sonora se presenta al aire libre o debido a la presencia de un obstáculo. Cuando se presenta el segundo caso, la onda sonora se propaga de manera diferente, siendo los principales fenómenos la absorción, reflexión, refracción y difracción.

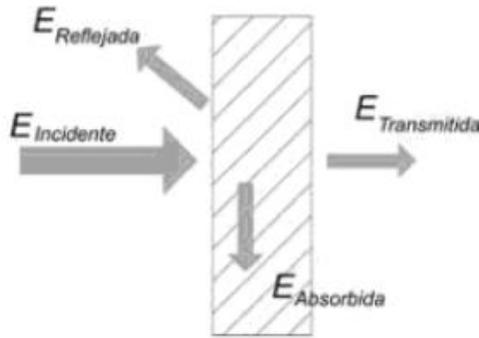


Figura 1.8. Balance energético de una onda sonora que choca con un obstáculo (Avilés López & Perera Martín, 2017)

Absorción acústica

Una de las maneras en la que se puede disminuir el ruido, es a través de la absorción. La absorción del ruido se presenta debido a un fenómeno termodinámico, el cual se traduce en pérdida de energía de la onda sonora debido a una transferencia de calor que se presenta. Además de que también intervienen características físicas del material que va a tener la función de absorber el ruido y las propiedades del medio en que se propaga la onda, así como la composición espectral de la misma (Avilés López & Perera Martín, 2017, pág. 44).

Para poder cuantificar la cantidad de energía que fue absorbida, se hace uso del coeficiente de absorción acústica. Este coeficiente de absorción se puede obtener haciendo uso de diferentes ecuaciones, dependiendo del método que sea empleado para la obtención de dichos coeficientes. Sin embargo, el concepto general para la obtención del coeficiente de absorción se representa en la ecuación 5:

$$\alpha_s = \frac{I_{ind} - I_{ref} - I_{trans}}{I_{ind}} \quad (5)$$

En donde:

α_s = coeficiente de absorción acústica

I_{ind} = intensidad acústica inducida

I_{ref} = intensidad acústica reflejada

I_{trans} = intensidad acústica transmitida

Cuando toda la energía incidente es absorbida, entonces el valor de α_s será igual a 1, en caso contrario, el valor de α_s será igual a 0.

A continuación, se muestran algunos coeficientes de absorción acústica de diferentes materiales.

Material	Coeficiente de absorción α a la frecuencia					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Hormigón sin pintar	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04
Hormigón pintado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Ladrillo visto sin pintar	0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05
Ladrillo visto pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Revoque de cal y arena	0,04	0,05	0,06	0,08	0,04	0,06
Placa de yeso (Durlock) 12 mm a 10 cm	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09
Yeso sobre metal desplegado	0,04	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03
Mármol o azulejo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Madera en paneles (a 5 cm de la pared)	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Madera aglomerada en panel	0,47	0,52	0,50	0,55	0,58	0,63
Parquet	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Parquet sobre asfalto	0,05	0,03	0,06	0,09	0,10	0,22
Parquet sobre listones	0,20	0,15	0,12	0,10	0,10	0,07
Alfombra de goma 0,5 cm	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Alfombra de lana 1,2 kg/m ²	0,10	0,16	0,11	0,30	0,50	0,47
Alfombra de lana 2,3 kg/m ²	0,17	0,18	0,21	0,50	0,63	0,83
Cortina 338 g/m ²	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina 475 g/m ² fruncida al 50%	0,07	0,31	0,49	0,75	0,70	0,60
Espuma de poliuretano (Fonac) 35 mm	0,11	0,14	0,36	0,82	0,90	0,97
Espuma de poliuretano (Fonac) 50 mm	0,15	0,25	0,50	0,94	0,92	0,99
Espuma de poliuretano (Fonac) 75 mm	0,17	0,44	0,99	1,03	1,00	1,03
Espuma de poliuretano (Sonex) 35 mm	0,06	0,20	0,45	0,71	0,95	0,89
Espuma de poliuretano (Sonex) 50 mm	0,07	0,32	0,72	0,88	0,97	1,01
Espuma de poliuretano (Sonex) 75 mm	0,13	0,53	0,90	1,07	1,07	1,00
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 25 mm	0,15	0,25	0,40	0,50	0,65	0,70
Lana de vidrio (fieltro 14 kg/m ³) 50 mm	0,25	0,45	0,70	0,80	0,85	0,85
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 25 mm	0,20	0,40	0,80	0,90	1,00	1,00
Lana de vidrio (panel 35 kg/m ³) 50 mm	0,30	0,75	1,00	1,00	1,00	1,00
Ventana abierta	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Vidrio	0,03	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04

Figura 1.9. Coeficientes de absorción acústica de diferentes materiales.
Fuente: <http://www.equaphon-university.net/ecuacion-de-sabine/>, tomada 2018

Para poder obtener el coeficiente de absorción acústica de algún material, se hace uso de la cámara reverberante o el tubo de impedancia.

Cámara reverberante

La cámara reverberante es un laboratorio en donde se llevan a cabo diversos ensayos tales como: la determinación de la potencia sonora que emite una fuente generadora de sonido, pérdidas de inserciones en silenciadores, las características acústicas de equipos de audio y emisión de sonido, así como la obtención de coeficientes de absorción acústica de diversos materiales.

Una de las principales características de la cámara reverberante es que ésta está diseñada para que las paredes de la cámara puedan reflejar la energía sonora que produce la fuente emisora de sonido. Esto se debe a que, dentro de la cámara se debe de crear un campo de sonido que permita que la energía sonora fluya de manera igualitaria en todas las direcciones de la cámara, creando así un ambiente acústico difuso.



Figura 1.10. Cámara reverberante
Fuente: CCADET UNAM

Una cámara reverberante cuenta básicamente con tres elementos: fuente de sonido, micrófonos y difusores. En el caso de los difusores, estos permiten la creación de un campo sonoro, ya que las ondas sonoras que se generan por medio de la fuente de sonido “chocan” en los difusores, generando que dichas ondas se reflejen e incidan en la muestra que se va a estudiar. En la figura 1.11 se muestra un esquema de acomodo de una cámara reverberante.

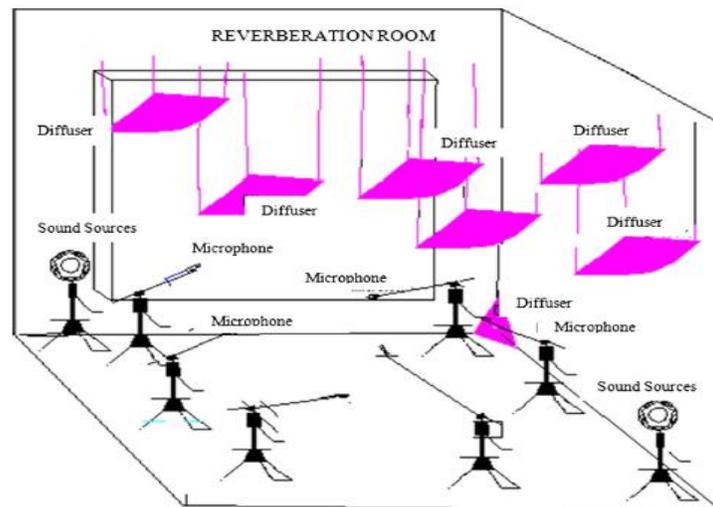


Figura 1.11. Esquema de una cámara reverberante (Azkorra et al., 2015)

Para poder garantizar que una cámara reverberante cuente con la calidad necesaria para realizar ensayos acústicos, se tiene como base la UNE-EN ISO 354 “Medición de la absorción acústica en una cámara reverberante”. En este reglamento se especifican las características que debe cumplir dicha cámara. A continuación, se muestran algunas de dichas especificaciones.

1. Las dimensiones de la cámara deben de oscilar entre los 150 y los 200 m^3 . En caso de que se tengan dimensiones mayores a 500 m^3 , se tiene una mayor probabilidad de obtener errores mayores en los ensayos.
2. Las dimensiones de la cámara deben cumplir la siguiente condición:

$$I_{m\acute{a}x} < 1.9 V^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

En donde:

$I_{m\acute{a}x}$ = longitud de la línea más larga que se encuentra en los límites de la cámara reverberante en m. En el caso de que la cámara sea rectangular, la longitud más larga será la diagonal.

V = volumen de la cámara en m^3

Tubo de impedancia

El uso del tubo de impedancia es otro método que también permite obtener el coeficiente de absorción acústica de algún material. Este aparato está elaborado de materiales rígidos y con sección transversal uniforme. Las paredes del tubo de impedancia no deben de ser porosas o contener ranuras, de lo contrario, el ruido que se llegue a generar dentro del tubo se podrá “escapar”. Otra de las características del tubo de impedancia es que debe estar aislado de ruido y vibraciones externas.



Figura 1.12. Tubo de impedancia
Fuente: <http://www.acusonic.cl/>, tomada 2017

Una de las principales diferencias entre el tubo de impedancia y la cámara reverberante para la obtención del coeficiente de absorción acústica, es el hecho de que en el tubo de impedancia las ondas sonoras inciden de manera perpendicular a la muestra de estudio. En el caso de la cámara

reverberante, las ondas sonoras chocan con los difusores, ocasionando que las ondas sonoras se reflejen, por lo que las ondas llegan a la muestra con ángulos de incidencia diferentes.

Existen varios métodos de uso para un tubo de impedancia, cada uno de dichos métodos es empleado para diferentes objetivos. Para poder determinar el coeficiente de absorción acústica, el método más sencillo es el método de onda estacionaria. En la figura 1.13 se muestran los componentes de un tubo de impedancia además de que brinda una idea general acerca del funcionamiento del mismo.

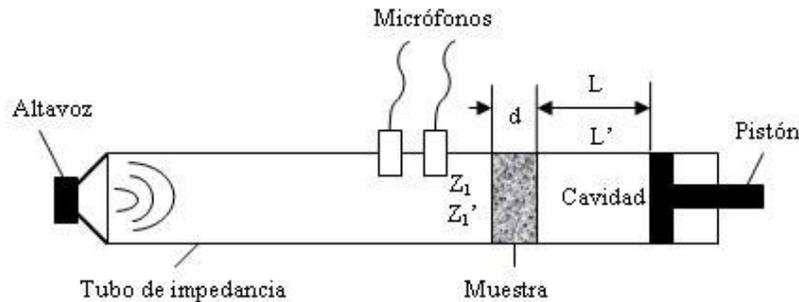


Figura 1.13 Componentes de un tubo de impedancia.

Fuente: <http://www.upv.es/ingmec/Ruido/absorbente.htm>, tomada 2017

En el tubo de impedancia, se cuenta con una fuente de ruido, la cual generará ondas en el interior del tubo. En el extremo opuesto de la fuente de ruido, se coloca la muestra que se va a estudiar. Las ondas que han sido generadas por la fuente van a incidir de manera perpendicular a la muestra. A su vez, la onda incidente a la muestra se reflejará creando una superposición entre la onda incidente y la onda reflejada.

Esta superposición entre ondas genera diferentes niveles de presiones. Para poder medir dichas presiones se hace uso de una sonda, la cual está integrada en los micrófonos y que permitirá registrar los niveles de presión máxima y mínima que se presenta dentro del tubo de impedancia. Una vez obtenidos los niveles de presión máxima y mínima dentro del tubo, se hace uso de la ecuación 7:

$$|r| = \frac{\frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|} - 1}{1 + \frac{|p_{\max}|}{|p_{\min}|}} \quad (7)$$

En donde:

r = coeficiente de reflexión acústica

p_{\max} = presión máxima registrada dentro del tubo de impedancia.

p_{\min} = presión mínima registrada dentro del tubo de impedancia.

Para poder obtener el coeficiente de absorción, se hará uso de la ecuación 9:

$$\alpha = 1 - |r|^2 \quad (8)$$

En donde:

r = coeficiente de reflexión acústica

α = coeficiente de absorción acústica

Reflexión acústica

La reflexión acústica se presenta cuando una onda sonora choca con un obstáculo, una parte de la energía se va a transmitir y la otra se va a reflejar. A su vez, la onda que ya ha sido reflejada puede volver a encontrarse con un segundo obstáculo ocasionando una superposición de ondas. La energía que será reflejada dependerá de las características acústicas del obstáculo y la frecuencia de la onda.

El fenómeno de reflexión prácticamente consiste en que al momento que la onda incidente choca con el obstáculo, la onda que fue reflejada se va a propagar con el mismo ángulo que la onda sonora incidente. Lo anterior se conoce como reflexión especular.

Esta reflexión especular se va a presentar cuando la superficie de reflexión sea completamente lisa, en caso contrario, se tendrá una reflexión no especular o difusa, lo cual da paso a otro fenómeno de reflexión de onda: la difusión.

La difusión sonora es muy estudiada en el área de acondicionamiento acústico en recintos cerrados. Como resultado de dichos estudios, se tienen los difusores acústicos, los cuales son empleados para que en el momento de que una onda sonora incida sobre el difusor, el sonido se disperse de manera homogénea en todo el recinto. El uso principal de estos difusores es crear un sonido envolvente que sea agradable para el receptor y así, poder brindar una acústica de calidad dentro del recinto. Otro de los usos de los difusores es el eliminar anomalías sonoras como ecos, focalizaciones del sonido entre otros.

El coeficiente de difusión puede entenderse como la fracción de energía acústica que ha sido reflejada en una manera no especular. La reflexión no especular o difusa, es aquella que se presenta cuando las ondas sonoras chocan con una superficie rugosa y ocasionan que las ondas se reflejen en diversos ángulos, tal y como se muestra en la figura 1.14.

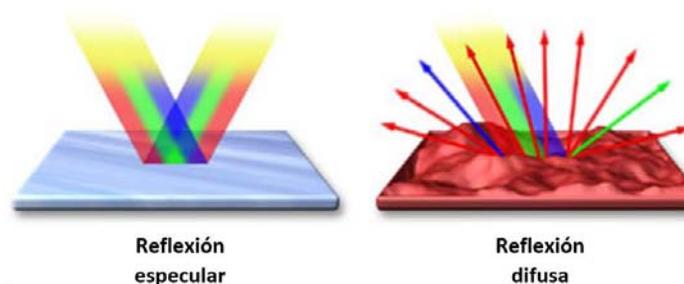


Figura 1.14 Reflexión especular y reflectiva.

Fuente: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/reflection/specular/>, tomada 2017

Estos coeficientes de difusión acústica tienen valores del 0 al 1, lo cual indican, en el caso de tener valor igual o cercano a cero, que el elemento que se está estudiando no presenta difusión y que su superficie puede considerarse como plana. En el caso de que el coeficiente sea igual o cercano a 1, entonces el material es buen difusor y, por lo tanto, presenta una superficie rugosa.

Para poder obtener este coeficiente de difusión acústica se hace uso de dos métodos, el primero es a través del uso de una cámara reverberante y el segundo método hace uso de una cámara anecoica o semi anecoica. Ambos métodos son muy diferentes entre sí, ya que el primero obtiene como tal un número o un valor cerrado, mientras que haciendo uso de una cámara anecoica se pueden obtener gráficos que permiten observar la trayectoria de las ondas al ser reflejadas.

Anteriormente se había mencionado en que consiste una cámara reverberante, la cual frecuentemente es empleada para obtener los coeficientes de absorción acústica de determinado material. Una cámara anecoica tiene la característica de absorber totalmente las reflexiones producidas por una onda sonora. También tiene la característica de estar totalmente aislada de cualquier ruido externo, por lo que, se genera un sonido directo y sin reverberación.



Figura 1.15 Cámara semi anecoica.

Fuente: <http://www.ipernity.com/doc/777361/40684482>, tomada 2017

En un artículo publicado por el Acta Acustica United with Acustica, los investigadores Hong-Seok Yang, Jian Kang y Cris Cheal (Yang, Kang, & Cheal, 2013), presentan una manera de poder obtener el coeficiente de difusión de algunas especies de vegetación haciendo uso de la ISO 17497-1 (Measurements for random-incidence scattering coefficient). Para ello, consideran la siguiente expresión matemática:

$$S = \frac{\alpha_{spec} - \alpha_s}{1 - \alpha_s} \quad (9)$$

En donde:

s = coeficiente de difusión

α_{spec} = coeficiente de absorción de incidencia especular

α_s = coeficiente de absorción

A su vez, para poder determinar los coeficientes de absorción necesarios, se hace uso de las expresiones 10 y 11:

$$\alpha_s = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_{spec} = 55.3 \frac{V}{S} \left(\frac{1}{c_4 T_4} - \frac{1}{c_3 T_3} \right) \quad (11)$$

En donde:

V = volumen de la cámara reverberante m^3

S = área de la muestra a ensayar m^2

c = velocidad del sonido m/s

T = tiempo de reverberación s

Cuando se hace uso de la cámara anecoica o semi anecoica, se hace uso de la expresión matemática 12:

$$d_\theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2 - \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n \left(10^{\frac{L_i}{10}} \right)^2} \quad (12)$$

En donde:

d_θ = coeficiente de difusión en un ángulo θ

L_i = nivel de presión sonora en la posición i

n = número de micrófonos

Una de las principales características de este método es que el coeficiente de difusión es evaluado en bandas de un tercio de octava con frecuencias de 100 a 5 kHz.

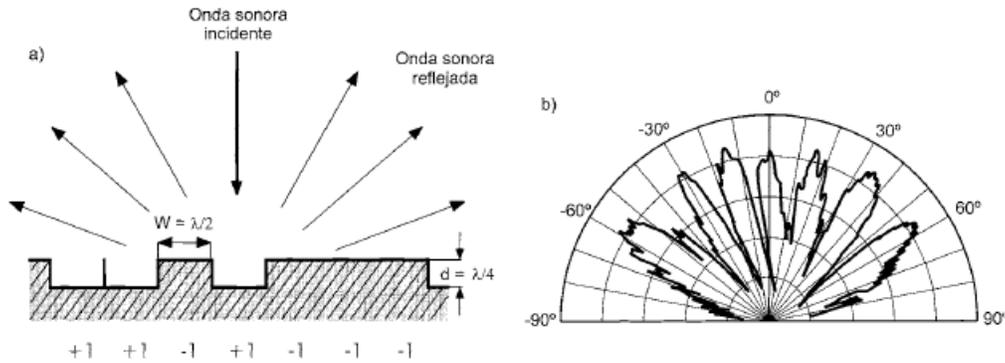


Figura 1.16. Perfil y diagrama de difusión de un difusor MLS (Carrión Isbert, 1998)

Refracción acústica

La refracción acústica se presenta cuando una onda sonora incide en el obstáculo y ésta se propaga por el interior del mismo ocasionando un cambio de dirección en la propagación de la onda. Al igual que los fenómenos anteriores, la refracción de la onda sonora va a depender de las propiedades del medio de propagación.

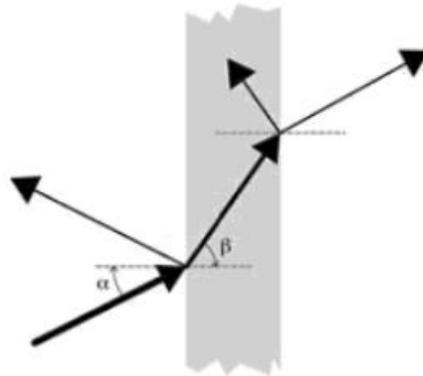


Figura 1.17. Reflexiones y refracciones de una onda incidente a un obstáculo (Avilés López & Perera Martín, 2017)

Difracción acústica

La difracción sonora es una propiedad física de las ondas sonoras, la cual implica que, al existir un obstáculo en la trayectoria de la onda acústica, ésta se vea obligada a rodear dicho obstáculo. La difracción sonora, también puede presentarse en presencia de aberturas dentro del mismo obstáculo. En este caso, la difracción de la onda sonora dependerá del tamaño de la abertura.

Para que se pueda producir la difracción, es necesario que la longitud del obstáculo u orificio sea de dimensiones semejantes a longitud de onda de las ondas acústicas incidentes. Si lo anterior se cumple, entonces las ondas sonoras rodearán la barrera, generando así una zona de difracción y una zona de sombra.

Cuando el tamaño de la abertura es similar a la longitud de onda, se presenta una difracción, lo que ocasiona que la abertura sea la nueva fuente emisora de sonido y como consecuencia, las ondas sonoras se propagarán a partir de la nueva fuente. Esto también se conoce como fuente secundaria de ondas.

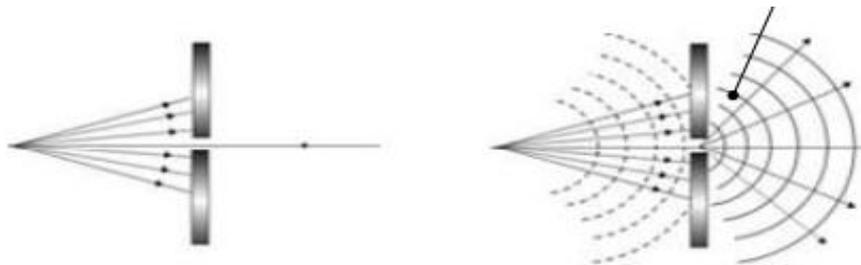


Figura 1.18 Difracción de onda con abertura similar a la longitud de onda.
Fuente: <https://www.uv.es/jmarques/>, tomada 2017

En el caso de que la abertura sea de mayor longitud a la longitud de onda sonora, entonces no se presenta difracción o se hace prácticamente imperceptible.

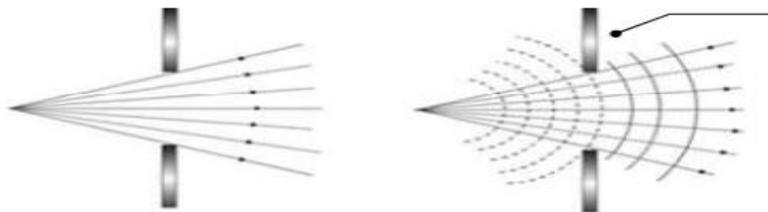


Figura 1.19 Abertura de mayor longitud a la onda sonora
Fuente: <https://www.uv.es/jmarques/>, tomada 2017

1.3 Presión sonora y nivel de presión sonora

La presión sonora puede entenderse como la diferencia o variación de presión que existe entre la presión atmosférica y la presión generada por un sonido. Cuando la fuente o el foco no emite sonido, se tiene una presión igual a la presión atmosférica, pero al entrar en vibración el foco, se generan ondas sonoras las cuales van a ocasionar una disminución o incremento en la presión del medio. Por lo que se puede entender como presión sonora a la suma entre la presión atmosférica y la presión generada por las ondas sonoras.

$$P(T) = P_A + p(t) \quad (13)$$

En donde:

$P(T)$ = Presión acústica

P_A = Presión atmosférica

$p(t)$ = presión debida al sonido

Un concepto de gran importancia, también relacionado con la presión sonora, es el nivel de presión sonora. El nivel de presión sonora puede entenderse como el logaritmo de una presión dada, con respecto a una presión acústica de referencia. Para obtener el nivel de presión sonora, se tiene la ecuación 14:

$$L_p = 20 \log_{10}(p/p_0) \quad (14)$$

En donde:

L_p = Nivel de presión acústica en dB

P = Presión sonora en Pa

P_0 = Presión de referencia, generalmente 20^{-12} Pa

El termino nivel es empleado para poder representar la variedad de presiones que el oído humano puede percibir. Esto se debe a que no todas las fuentes emiten sonido a presiones de igual magnitud. Si se compara el sonido que genera la caída de una hoja de un árbol con respecto al sonido que genera una trompeta, existe una gran diferencia en los niveles auditivos. Además, el aparato auditivo del ser humano no percibe el sonido de manera lineal, es más, los niveles sonoros que percibe una persona corresponden a un comportamiento logarítmico.

1.4 Potencia acústica y nivel de potencia sonora

La potencia acústica es la cantidad de energía que libera una fuente o un foco a través de ondas sonoras en un determinado tiempo. La potencia acústica está ligada a la longitud de onda, ya que, si se tiene una longitud de onda pequeña, entonces se tendrá una mayor potencia sonora. La unidad de medida de la presión sonora es el Watt (W). La presión sonora también puede entenderse como la cantidad de energía emitida por una fuente, en todas las direcciones.

Para poder determinar el nivel de potencia sonora L_w , se hace uso de la siguiente ecuación:

$$L_w = 10 \log_{10} 10 \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (15)$$

En donde:

L_w = Potencia sonora dB

W = Potencia de la fuente generadora de ruido en W

W_0 = Potencia de referencia, generalmente este valor es de 10^{-12} W

1.5 Intensidad acústica y nivel de intensidad acústica

La intensidad acústica puede entenderse como el valor medio de la potencia acústica entre una unidad de área, esto hace referencia a la cantidad de potencia acústica que puede atravesar perpendicularmente a una unidad de área, en dirección a la propagación de la onda sonora. La intensidad sonora se mide en W/m^2 , y se calcula a través de la ecuación 16.

$$I = \frac{P}{A} \quad (16)$$

En donde:

I = Intensidad sonora W/m^2

P = Potencia acústica W

A = Área m^2

Otra manera de poder calcular la intensidad sonora es involucrando la potencia sonora con la densidad del medio elástico y la velocidad del sonido, por lo que la expresión matemática para poder obtener la intensidad sonora, involucrando estos tres elementos, queda de la siguiente manera:

$$I = \frac{p^2}{\rho c} \quad (17)$$

Donde:

I = Intensidad acústica W/m^2

p = Valor eficaz de presión acústica W

ρ = densidad del medio elástico kg/m^3

c = velocidad m/s

El nivel de intensidad sonora es el logaritmo de la intensidad con respecto a otra intensidad sonora de referencia. Para poder obtener el nivel de intensidad acústica, se hace uso de la expresión 18:

$$L_I = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (18)$$

Donde:

L_I = Nivel de intensidad acústica en dB

I = Intensidad acústica de la fuente generadora de ruido en W/m^2

I_0 = Intensidad acústica de referencia, generalmente tiene valor de $10^{-12} W/m^2$

1.6 ¿Qué es el ruido?

Existen diversas definiciones de ruido, pero en términos generales, el ruido puede entenderse como aquel sonido no deseado que resulte molesto o desagradable (Cabrera, 2014, pág.19). También puede definirse como el conjunto de sonidos de diferentes frecuencias que resulten desagradables para el oído humano (Hernández Corona, 2014). Cabe mencionar, que el término de ruido también puede llegar a ser subjetivo, ya que lo que una persona percibe como ruido, puede ser percibido como un sonido “agradable” para otra.

En una ciudad, se tienen diversas fuentes de ruido, dentro de las más importantes se tienen:

Ruido por tránsito vehicular

Esta fuente de ruido es generada por el motor del vehículo y por la fricción que se presenta cuando el vehículo hace contacto con el suelo y el aire. Los niveles de ruido que se pueden llegar a presentar dependen del volumen de automóviles que transitan en una vialidad, además de la velocidad a la cual circulan y del peso de los mismos.

Ruido por fábricas

El ruido proveniente de fábricas es muy variado en relación con niveles de intensidad, duración y espectro, siendo los más importantes los ruidos continuos, discontinuos y de impacto.

Los ruidos continuos son aquellos que se presentan durante la mayor parte de una jornada laboral, por lo que su duración es prácticamente constante. Un ruido discontinuo es aquel que también se presenta la mayor parte de la jornada laboral, pero que presenta interrupciones, como el caso de una máquina de coser. Por último, los ruidos de impacto tienen poca duración, inclusive pueden llegar a durar pocos segundos. Ejemplo de un ruido de impacto es la caída de un pedazo de metal sobre el suelo.

Ruido por oficinas

Los ruidos por oficinas son generados por el ruido de las computadoras, por electrónicos, conversaciones e incluso por el sonar de los teléfonos. Este tipo de ruido es relativamente fácil

de mitigar, ya que, mediante algún tipo de revestimiento en paredes y techos se puede absorber el ruido.

Ruido por tránsito aéreo

Este tipo de ruido depende de la velocidad del viento, la velocidad en la que vuela un avión, la rapidez en la que giran las turbinas, además de los motores de estos transportes. Este tipo de ruido ha sido el más problemático dentro del control de ruido ambiental, ya que las personas que viven más cercanas a algún aeropuerto son las más afectadas.

Ruido por tránsito ferroviario

Generalmente, los trenes producen ruidos con frecuencia relativamente baja, pero al igual que otros sistemas de transporte, la generación de ruido va a depender del tipo de vagones, rieles y locomotoras, así como la velocidad en la que transitan. En el caso de los trenes de alta velocidad, estos emiten sonidos de mayor energía acústica, logrando que se perciba ruido de igual intensidad que la que emite un avión.

2. Impactos del ruido en el humano

2.1 El oído humano

El oído es un órgano que es capaz de transformar las presiones sonoras en sensaciones auditivas. En el caso del oído humano, la sensibilidad es limitada, ya que como se ha mencionado, los humanos solamente perciben frecuencias entre los 20 y los 15,000 Hz. Además, el oído humano también contribuye al equilibrio del ser humano (Hernández Corona, 2014, pág. 30).

Para poder entender las afectaciones que sufre el oído debido a la exposición de ruido, es necesario ahondar en la anatomía y fisiología del oído humano.

Primero, es necesario entender que el oído humano está dividido en tres partes principales: oído externo, medio e interno.

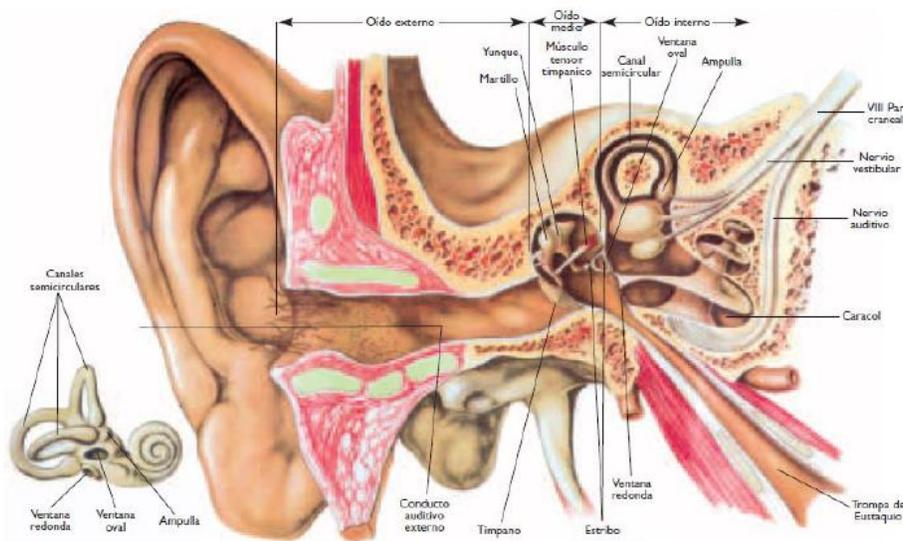


Figura 2.1 El oído humano (Hernández Corona, 2014)

Oído externo

El oído externo abarca desde el pabellón hasta el tímpano. La principal función del oído externo es transformar las ondas sonoras esféricas en planas, o en otras palabras, es el encargado de convertir la presión sonora en vibraciones (Galindo Briones, 2001, pág. 81). Además, es el encargado de incrementar la sensibilidad auditiva.

Las ondas sonoras que penetran en el oído externo ocasionan la vibración del tímpano. El tímpano puede entenderse como una pared entre el oído externo y el oído medio. Cuando el tímpano entra en vibración, estas vibraciones se transmitirán al oído medio.

Oído medio

El oído medio también tiene la función de convertir la presión sonora a vibraciones, además de que también funciona como protector del oído interno. En el oído medio se va a localizar el mecanismo transductor, el cual está conformado por una membrana timpánica, el martillo, el yunque y el estribo.

Cuando el tímpano entra en vibración, estas se transmiten al martillo y del martillo al yunque. En el caso del estribo, este se encarga de transmitir las vibraciones a la ventana oval, la cual es un recubrimiento de la cóclea que se encuentra en el oído interno.

Oído interno

El oído interno está conformado por un mecanismo receptor de equilibrio y auditivo. En el mecanismo auditivo se encuentra en la cóclea, el cual es un hueso en forma de caracol lleno de líquido. Cuando las presiones llegan a la ventana oval, éstas hacen vibrar el líquido de la cóclea permitiendo la oscilación de unos 25,000 filetes nerviosos (Hernández Corona, 2014, pág. 32). Estos filetes nerviosos son los encargados de transformar las vibraciones a señales nerviosas.

En el oído interno, también se encuentran ductos semicirculares que tienen la función de contribuir en el equilibrio del cuerpo.

2.2 Daños a la salud generados por el ruido ambiental

Los daños a la salud que se pueden presentar debido a la exposición de altos niveles de ruido son muy diversos, ya que se tienen desde los daños directos como pérdida de audición, así como efectos secundarios, como es el caso del estrés. Por lo anterior, se puede clasificar los daños a la salud como directos e indirectos.

Daños directos

Pérdida de capacidad auditiva

Uno de los principales daños a la salud, ocasionado por el ruido, es precisamente la pérdida de capacidad auditiva. Esta pérdida de capacidad auditiva es provocada por la exposición del oído a altos niveles de ruido durante un tiempo prolongado. A su vez, esta pérdida de capacidad auditiva se presenta de dos maneras posibles: desplazamiento temporal del umbral y desplazamiento permanente del umbral.

Desplazamiento temporal del umbral

El desplazamiento temporal del umbral se presenta cuando una persona es expuesta a altos niveles de ruido, durante un periodo de tiempo no tan largo. Este fenómeno se presenta cuando se asiste a un concierto, a un estadio, o a cualquier otro lugar con altos niveles de presión acústica. Al salir de dicho evento, se tiene la sensación de aturdimiento o de tener los oídos tapados.

En el caso del desplazamiento temporal del umbral, se tiene una pérdida de sensibilidad lo que ocasiona que, para poder oír un sonido, es necesario mayores niveles de presión acústica. A su vez, esto conlleva a un incremento en la sensibilidad auditiva a frecuencias cercanas a los 4000 Hz.

Afortunadamente, esta disminución en la falta de sensibilidad auditiva es recuperada pasadas unas horas o unos días, ya que fisiológicamente, esto se trata de una fatiga de las células ciliares que posteriormente regresan a su estado normal.

Desplazamiento permanente del umbral

El desplazamiento permanente del umbral es ocasionado por una exposición frecuente al ruido intenso y que no permite que el oído pueda recuperarse a la fatiga, teniendo como consecuencia, la debilitación y la muerte de las células ciliares.

El desplazamiento permanente del umbral se presenta cuando se tiene una exposición al ruido mayor a los 4000 Hz. Además, este desplazamiento permanente no se presenta de manera instantánea, sino que se genera de manera gradual, es decir que es una consecuencia de varios años.

Daños indirectos

Los daños indirectos, están relacionados con otros daños que también perjudican la salud del ser humano, pero que no están involucrados directamente con el oído. Dentro de los principales daños indirectos a la salud se tienen los siguientes:

Trastornos del sueño

La exposición al ruido puede ocasionar trastornos sobre el sueño, los cuales se pueden presentar de tres maneras diferentes.

1. El ruido puede producir alteraciones en el patrón o en la intensidad del sueño, e incluso interrupciones en el mismo. También se puede llegar a presentar incrementos en el ritmo cardiaco, cambios en la frecuencia respiratoria, entre otros. A este tipo de alteraciones se le denominan alteraciones primarias del sueño.
2. Las alteraciones secundarias, están relacionadas con los síntomas que se presentan al día siguiente de la exposición del ruido, tal como fatiga, modificación en el carácter, comportamiento y reducción en la calidad del sueño.
3. También se puede llegar a presentar efectos a largo plazo, como la aparición de enfermedades funcionales que pueden concluir en enfermedades progresivas e irreversibles.

Disminución de rendimiento y concentración

La disminución de rendimiento y de concentración, está sumamente ligada al ruido al que es sometido una persona, mientras realiza una actividad. Este ruido de fondo puede disminuir el rendimiento de la persona, especialmente en tareas que requieren de una mayor concentración (Cabrera, 2014,pág. 20).

Afectaciones psicológicas y al sistema inmunológico

Ante la presencia de altos niveles de ruido ambiental, una de las afectaciones psicológicas en el ser humano es el estrés. Esto se presenta debido al aumento en la producción de adrenalina en el cuerpo, lo cual ocasiona incrementos en la presión sanguínea y en el ritmo cardiaco.

Otra de las afectaciones debido al ruido está relacionada con el incremento en los niveles de cortisol, lo cual está ligado con el bajo funcionamiento del sistema inmunológico del ser humano. Esto ocasiona que las personas sean más susceptibles a contraer enfermedades.

3. Mitigación de ruido ambiental

Existen diversos métodos para el control de ruido ambiental, todos ellos tienen la finalidad de brindar un ambiente más agradable para las personas expuestas a dicho ruido y poder evitar riesgos a la salud, como los mencionados en el capítulo anterior.

En este caso, se abordarán diversos tipos de métodos de control de ruido: control de ruido mediante uso de reglamentos, mapas de ruido, paisaje sonoro y medidas tradicionales de control.

3.1 Control de ruido mediante uso de normativas y reglamentos

Este tipo de control de ruido está involucrado con la creación de políticas o normatividades que tienen la finalidad de reducir las emisiones de ruido para una mejor calidad de vida de las personas. Estas políticas abarcan desde el control de emisiones de ruido, hasta el control de tránsito vehicular. Dentro de estas normativas, también se ya llegado a considerar el control del uso del suelo debido al incremento de quejas provenientes de habitantes de viviendas construidas a pie de carretera (Jaeger-Cueppers, 2011).

En México, la NOM- 081-ECOL-1994, establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido en fuentes fijas, así como la metodología de medición. Esta norma fue publicada el 22 de junio de 1994 en el Diario Oficial de la Federación, siendo vigente desde entonces. En la tabla 3.1, se muestran los límites máximos permisibles de emisión de ruido.

HORARIO	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES
de 6:00 a 22:00	68 dB(A)
de 22:00 a 6:00	65 dB(A)

*Tabla 3.1 Límites máximos permisibles.
Fuente: NOM.081-ECOL-1994*

En la Ciudad de México, también se cuenta con la Norma Ambiental NADF-005-AMBR-2006, la cual también establece los límites máximos permisibles de emisiones sonoras y las condiciones de medición. Esta norma fue publicada en el Gaceta Oficial del Distrito Federal el 3 de mayo de 2006.

Horario	Límite máximo permisible
6:00 h. a 20:00 h.	65 dB (A)
20:00 h. a 6:00 h.	62 dB (A)

Tabla 3.2 Límites máximos permisibles

Fuente: NADF-005-AMBR-2006

3.2 Mapas de ruido

El uso de mapas de ruido no necesariamente es un método de mitigación de ruido, es más una herramienta gráfica que permite visualizar los puntos de mayor conflicto en cuanto a exposición de ruido. A partir de estos mapas, se puede proponer soluciones para el manejo de ruido ambiental en las zonas con mayores niveles de exposición de ruido.

El ruido ambiental ha sido una problemática de gran importancia dentro de las grandes ciudades, por ello, para poder abatir los niveles de sonoros, en el año 2002 se creó la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. Ésta fue publicada en el mismo año en el Diario Oficial de las Comunidades Europeas, teniendo como objetivo reducir, prevenir y evitar los efectos generados por la exposición al ruido ambiental.

Para poder lograr dicho objetivo, la Directiva 2002/49/CE sugirió que todos los miembros de la Unión Europea elaboraran un plan estratégico para poder abatir los niveles de ruidos sonoros dentro de las zonas urbanas de cada uno de los miembros de la UE. Para ello, dicho plan tendría que llevarse a cabo en tres etapas.

La primera etapa consistía en determinar los niveles sonoros de exposición de ruido ambiental a través de la elaboración de mapas de ruido. La segunda etapa era informar a la población acerca de los efectos del ruido ambiental. Por último, la tercera etapa consiste en adoptar planes de acción para prevenir y reducir el ruido ambiental haciendo especial énfasis cuando los niveles de exposición de ruido sean perjudiciales para el ser humano.

Una vez establecidos los objetivos de la Directiva 2002/49/CE, fue necesario homogenizar la metodología a emplear, así como definir algunos conceptos relacionados con el ruido ambiental. Uno de estos conceptos a definir era precisamente el de mapa de ruido.

De acuerdo con la Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, un mapa de ruido es la presentación de datos acerca de una situación acústica ya sea existente o pronosticada en función de un indicador de ruido. Para ello, en un mapa de ruido se deberá indicar el rebasamiento de un valor límite vigente, la cantidad de personas afectadas en una zona específica o el número de viviendas expuestas a determinados valores de un indicador de ruido en una zona específica (*DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental, 2002*).

A su vez, dentro de la definición de mapa de ruido, también se hace uso de la definición de mapa estratégico de ruido, el cual puede entenderse como un mapa que es diseñado para poder evaluar la exposición de ruido en una zona determinada y así poder realizar predicciones a futuro para la zona de análisis.

En términos generales, tanto el mapa de ruido como el mapa estratégico de ruido son herramientas gráficas que permiten conocer los niveles de exposición sonora dentro de una región. Para que ambos términos queden más claros, el mapa de ruido permite identificar las zonas con mayores niveles de ruido dentro de una zona de estudio, mientras que un mapa estratégico de ruido es una herramienta de proyección a futuro. En la figura 3.1 y 3.2, se presentan unos ejemplos de mapas de ruido y mapas estratégicos de ruido.

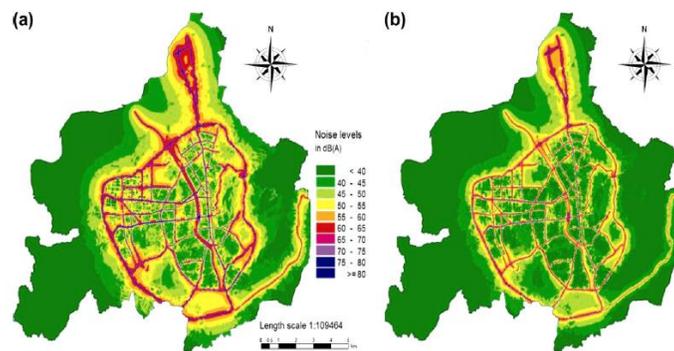


Figura 3.1 Mapa de ruido (Ko, Chang, & Lee, 2011)

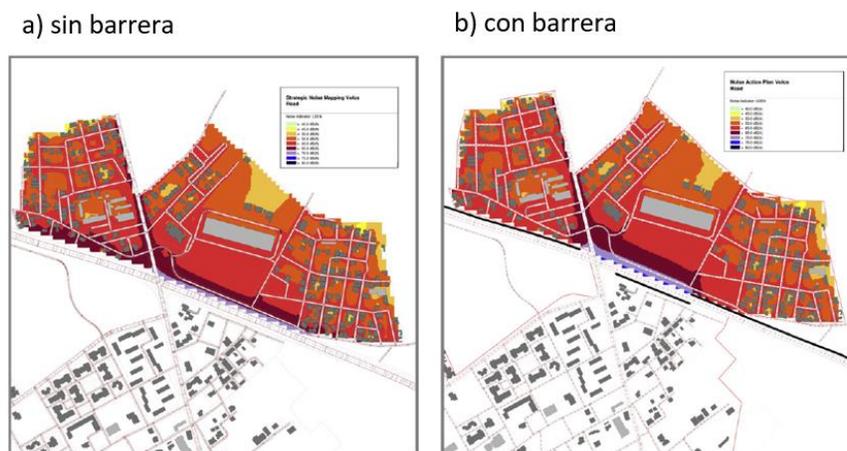


Figura 3.2. Mapa estratégico de ruido (Vogiatzis & Remy, 2014)

Tipos de mapas estratégicos de ruido

De acuerdo con la Directiva 2002/49/CE existen 4 tipos de mapas estratégicos de ruido: aglomeración, gran eje viario, gran eje ferroviario y gran aeropuerto.

- Aglomeración: se considera un mapa estratégico de aglomeración, a aquella porción de territorio que comprende a más de 100,000 habitantes y cuya densidad de población sea

considerada como zona urbanizada. Este tipo de mapas abarcan parte de un municipio, un municipio o varios municipios.

- Gran eje viario: este tipo de mapa considera cualquier carretera que cuente con una circulación vehicular anual superior a tres millones de vehículos.
- Gran eje ferroviario: abarca a vías férreas de cualquier tipo con tráfico superior a 30,000 trenes anuales.
- Gran aeropuerto: considera cualquier aeropuerto civil con más de 50,000 despegues y aterrizajes anuales.

A su vez, los mapas estratégicos de ruido deben ser organizados por Unidades de Mapa Estratégico (UME). Las UMEs pueden entenderse como aquellos elementos que son constituidos ya sea por una aglomeración, una carretera, unas vías de tren o un aeropuerto. Para poder tener UMEs ordenadas se hacen las siguientes recomendaciones:

- Cada UME debe contener un código de identificación único.
- Una UME puede estar formada por diferentes secciones de una misma carretera o vía férrea.
- La UME debe estar definida por una línea que tenga un inicio y un final, es decir, no debe presentar interrupciones.
- Una UME puede contar con tramos de diferentes intensidades de flujo vehicular y ferroviario.

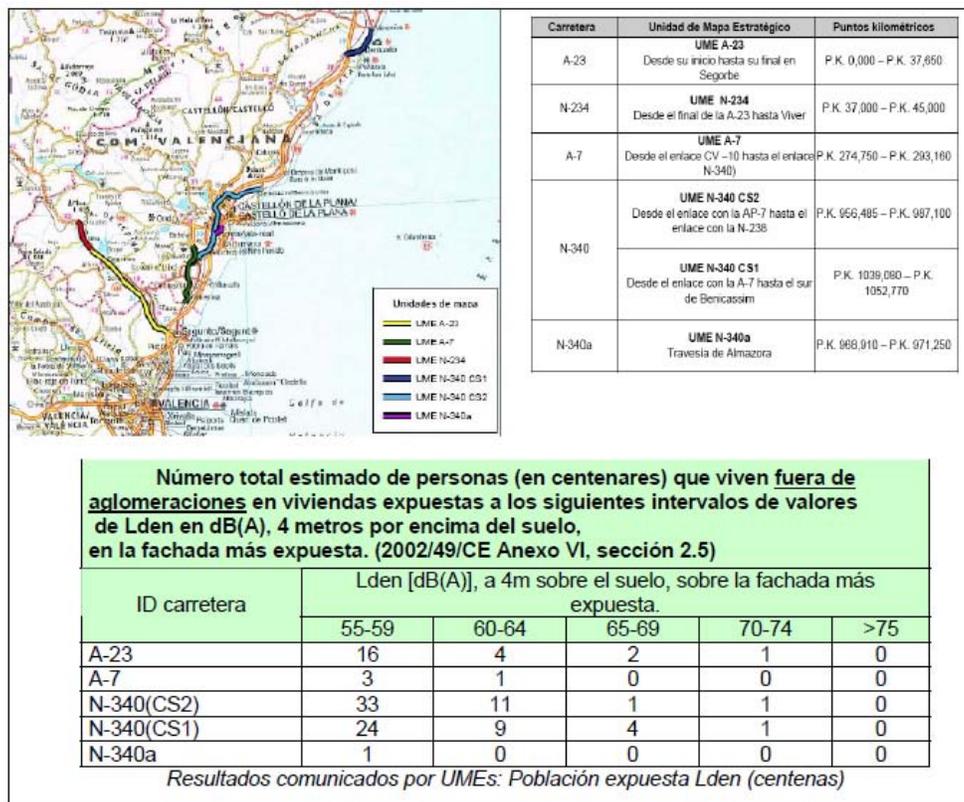


Figura 3.3. Ejemplo de organización por UMEs (Ambiente, De, & Evaluación, n.d.)

Como ya se ha mencionado, la Directiva 2002/49/CE homogenizó la metodología para la elaboración de los mapas de ruido, por lo que se seleccionaron los indicadores de ruido más comunes; L_{den} para evaluar las molestias debido a la exposición de ruido y L_{noche} para evaluar las alteraciones de sueño. Para poder obtener el nivel L_{den} , la Directiva 2002/49/CE propone el uso de la siguiente ecuación:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left(12 * 10^{\frac{L_{día}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{tarde}+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{noche}+10}{10}} \right) \quad (19)$$

En donde:

L_{den} = nivel sonoro de día-tarde-noche en dB

$L_{día}$ = nivel sonoro medio a largo plazo determinado a lo largo de todos los periodos diurnos de un año dB

L_{tarde} = nivel sonoro medio a largo plazo determinado a lo largo de todos los periodos vespertinos de un año dB

L_{noche} = nivel sonoro medio a largo plazo determinado a lo largo de todos los periodos nocturnos de un año dB

3.3 Paisaje sonoro

Una manera de mitigación de ruido ambiental es a través de la ocultación. Este término de ocultación hace referencia a la sustitución de un ruido molesto por uno más agradable. Es precisamente el área de paisaje sonoro el que se encarga de realizar esta ocultación acústica.

El concepto de paisaje sonoro surge en los años 1960 por el músico canadiense R. Murray Schafer a través del World Soundscape Project, el cual fue un proyecto de investigación en conjunto con la Simon Fraser University de Canadá. Prácticamente, en este proyecto se sentaron las bases de lo que hoy se conoce como paisaje sonoro o ecología sonora, ya que Schafer vio la necesidad de combatir la contaminación por ruido siempre y cuando se encontrara una armonía entre el ser humano y su entorno.

A partir del World Soundscape Project, se han realizado diversas investigaciones en Europa y en Canadá, y en años más recientes, países asiáticos como Japón y Corea del Sur, también se han sumado a dichas investigaciones. En el año 2010, se llevó a cabo un ciclo de conferencias en Estocolmo, Suecia relacionado con el diseño de paisaje sonoro para el desarrollo urbano sustentable. Precisamente en este ciclo de conferencias se sentaron las nuevas bases y los nuevos retos que presenta el paisaje sonoro.

De acuerdo con Östen Axelsson (2010), investigador del Departamento de Psicología de la Universidad de Estocolmo, el paisaje sonoro hace referencia al ambiente acústico dentro de un lugar, ya sea un área residencial o un parque urbano y como dicho ambiente es percibido por las personas dentro de un contexto. A su vez, el paisaje sonoro incluye todas las fuentes de sonido ya sean deseados y no deseados.

A su vez, el paisaje sonoro está conformado por tres tipos de sonido: geofonía, biofonía y antropofonía. La geofonía abarca todos aquellos sonidos generados por fuentes no biológicas, ejemplo de ello es el ruido del viento o de la lluvia. La biofonía son los sonidos provenientes de organismos vivos. Por último, la antropofonía son los sonidos generados por el ser humano, este tipo de sonido abarca desde la música, hasta el ruido provenientes de fábricas.

Generalmente, para poder combatir el ruido ambiental se hace uso del concepto control de ruido. Cabe mencionar que el control de ruido y el paisaje sonoro son dos enfoques diferentes para poder disminuir los niveles de exposición de ruido ambiental. El control de ruido percibe al ruido como un “contaminante” y, por ende, busca medidas para reducir los niveles de exposición. Otra de las características del control de ruido es que éste trata de entender la respuesta humana relacionada con ciertos niveles de ruido ambiental.

Desde la perspectiva del paisaje sonoro, el ruido ambiental es considerado como un recurso más y se enfoca en diferenciar entre los sonidos “deseados” y los “no deseados”. Además, su objetivo final no es silenciar el ruido, sino que busca crear un ambiente acústico representativo de una región o ciudad empleando cada uno de los sonidos que emite dicha zona. Por lo que, el paisaje sonoro busca enmascarar los sonidos no deseados con sonidos que sean más agradables para el oído humano.

Los contrastes que se presentan entre el control de ruido y el paisaje sonoro ocasionan que el control de ruido sea manejado en áreas meramente ingenieriles, ya que la única información necesaria son los niveles de exposición de ruido, la respuesta humana ante dicha exposición y cómo darle solución a la problemática. A diferencia del control de ruido, el paisaje sonoro involucra áreas como las ciencias sociales, la medicina, la ingeniería y la arquitectura, por mencionar algunas.

Para poder desarrollar un ambiente sonoro agradable, ya sea en una ciudad o en cualquier otro lugar, se cuentan con diferentes metodologías o etapas de diseño. Una de las etapas de diseño propuesta, es la de A.L. Brown (2004), investigador de la Universidad de Griffith. En su investigación, se plantean los siguientes puntos:

- Planteamiento de objetivos acústicos: este es el primer paso dentro de la planeación y manejo del paisaje sonoro, ya que en este punto se deben de determinar qué tipo de sonidos se quieren emitir en espacios al aire libre. Algunos ejemplos de estos objetivos acústicos se presentan en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Objetivos acústicos (Brown & Muhar, 2004)

Ejemplos de objetivos acústicos	
A	El sonido generado por el movimiento del agua debe ser un sonido dominante
B	Un sonido en particular (icónico) debe ser escuchado claramente en determinadas áreas
C	Escuchar sonidos creados de manera no mecánica por personas
D	No percibir sonidos humanos
E	El sonido de la naturaleza debe de ser el sonido dominante
F	Solamente se deben escuchar sonidos provenientes de la naturaleza

- Identificación de sonidos deseados y no deseados: en esta etapa es necesario identificar los sonidos deseados y no deseados. Esto generalmente se logra a través de cuestionarios en donde se pregunta a la población qué tipo de sonidos se les hace agradable o desagradable. La problemática de este método es que no cuenta con una base científica, ya que la percepción del sonido entre una persona y otra varía de acuerdo con sus preferencias y sus cualidades físicas.
- Manejo o diseño: en esta etapa se tienen dos posibles alternativas, en el caso del diseño se tiene la opción de enmascarar u ocultar el sonido no deseado por uno más agradable. En el caso del manejo, será necesario garantizar que el sonido no deseado no oculte el sonido deseado.

Para poder sintetizar la metodología descrita por A.L. Brown (2004), se hace uso del diagrama mostrado en la figura 3.4.

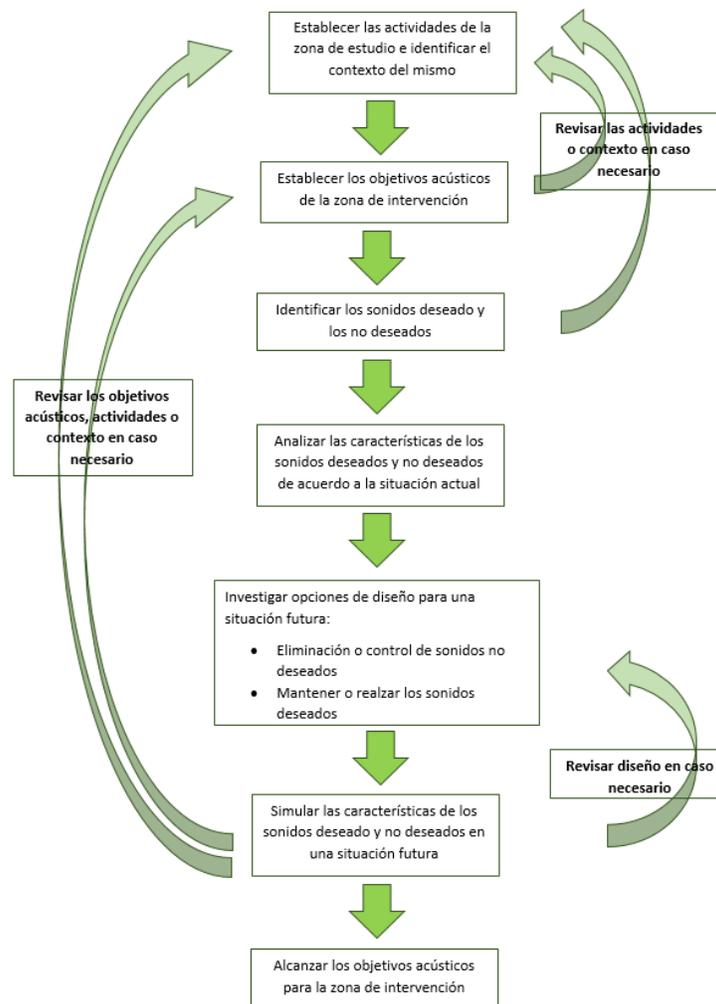


Figura 3.4. Etapas del desarrollo de un ambiente sonoro (Brown & Muhar, 2004)

Cabe mencionar que antes de establecer los objetivos acústicos, es necesario contar con información previa de la zona de intervención. Esta información abarca desde mapas de ruido, población que se encuentra expuesta al ruido ambiental, tipos de industria que se encuentran dentro de la zona de estudio, entre otros. Por ello, Jian Kang (2011), investigador de la Universidad de Sheffield del Reino Unido, establece un sistema para poder describir los elementos que componen a un paisaje sonoro urbano, el cual se muestra en la figura 3.5.

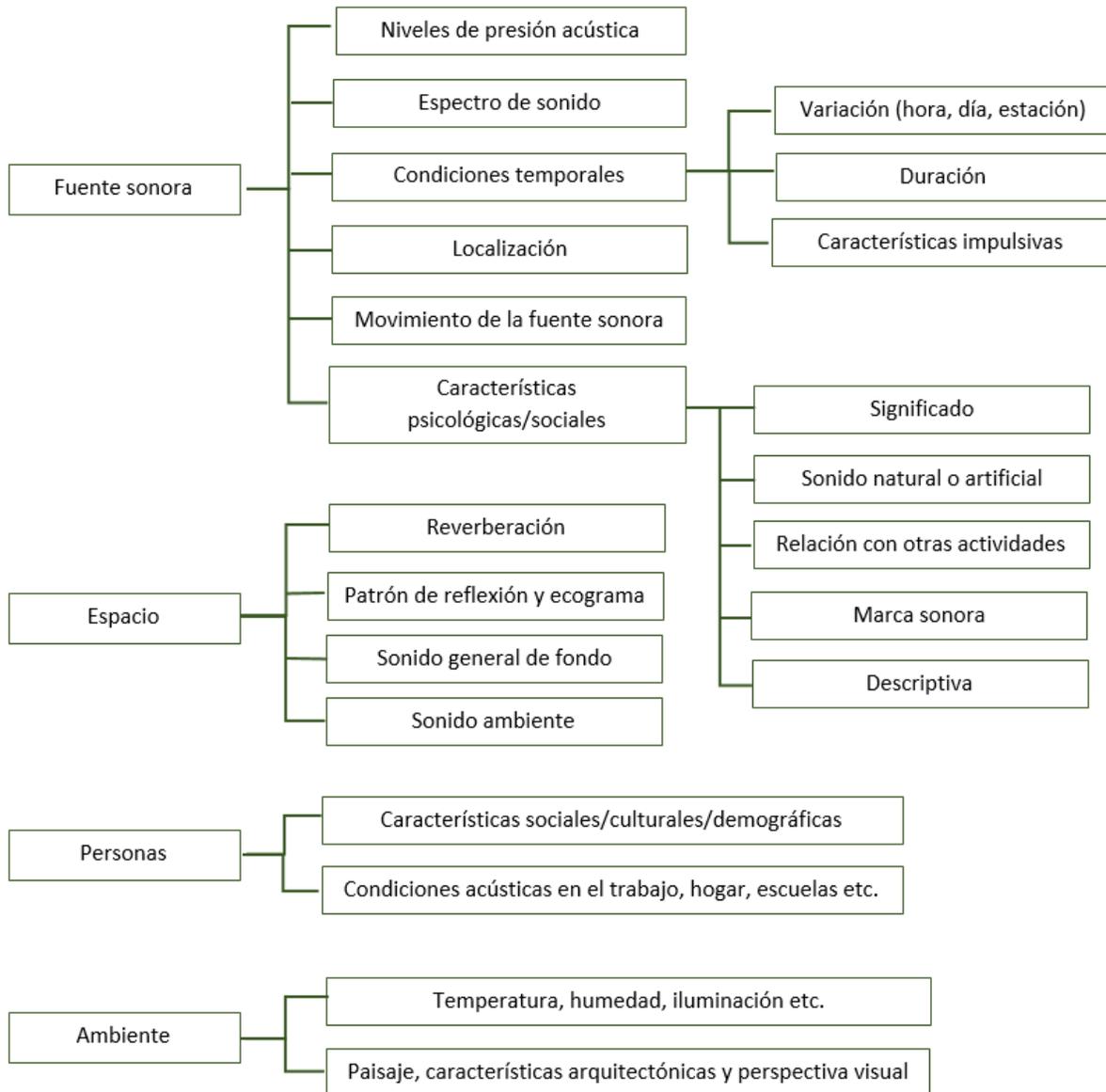


Figura 3.5. Elementos de composición de un paisaje sonoro (Brown & Muhar, 2004)

Con base en las investigaciones de Jian Kang (2011), el paisaje sonoro no puede ser analizado desde solo una perspectiva ni tampoco puede generalizarse. Es decir, no se puede colocar un elemento sonoro que ha funcionado en una ciudad en otra ciudad con características similares. Esto se debe a que las cuestiones socioculturales juegan un papel importante dentro del diseño de un paisaje sonoro. Por ello, sus investigaciones se han enfocado en transmitir la idea de que para cada ambiente se debe de hacer uso de elementos diferentes.

Retomando el proceso de diseño de A.L. Brown (2004), dentro de la etapa de identificación de sonidos deseados y no deseados se hace uso de cuestionarios y entrevistas a la población. Es precisamente en esta etapa en donde Jian Kang ha desarrollado algunas de sus investigaciones.

En una de sus investigaciones, uno de los puntos que aborda es la diferencia que existe en los sonidos que personas provenientes de diferentes ciudades prefieren. Para ello, hace una comparación entre las ciudades de Sheffield en el Reino Unido, Taipéi en Taiwán y Pekín en China. A la conclusión a la que llega es que el 70% de los encuestadores en Sheffield prefieren escuchar sonidos de cánticos de aves, mientras que en Pekín y en Taipéi solo un 25% y un 32% de los encuestadores prefieren escuchar estos sonidos. Caso contrario cuando se les preguntó si preferían escuchar música ambiente, ya que mientras que en Taipéi y en Pekín el 26% y el 42% de los encuestadores preferían escuchar música ambiente, en Sheffield solo un 4% mostró el mismo interés (Kang, 2011)

Pero las diferencias en la preferencia de sonidos no solo es una cuestión cultural, también es una cuestión de edad y de género. En otra investigación realizada por Kang (2016), pero ahora en colaboración con Fangfang Liu (2016), investigadora del Instituto de Tecnología de Harbin, llevaron a cabo una investigación en donde reflejan esta cuestión.

Este estudio se realizó en la ciudad de Sheffield localizada en el Reino Unido, con el fin de determinar las “necesidades psicológicas” de las personas para la creación de un paisaje sonoro dentro un ambiente urbano. Para dicho estudio, se realizaron entrevistas desde tres ambientes diferentes, el primero se llevaría a cabo en la calle, el segundo en casa y el tercero en oficinas. En estas entrevistas, los entrevistadores tenían que mencionar los sonidos que eran agradables o desagradables para ellos. En la figura 3.6, se presentan dichos resultados.

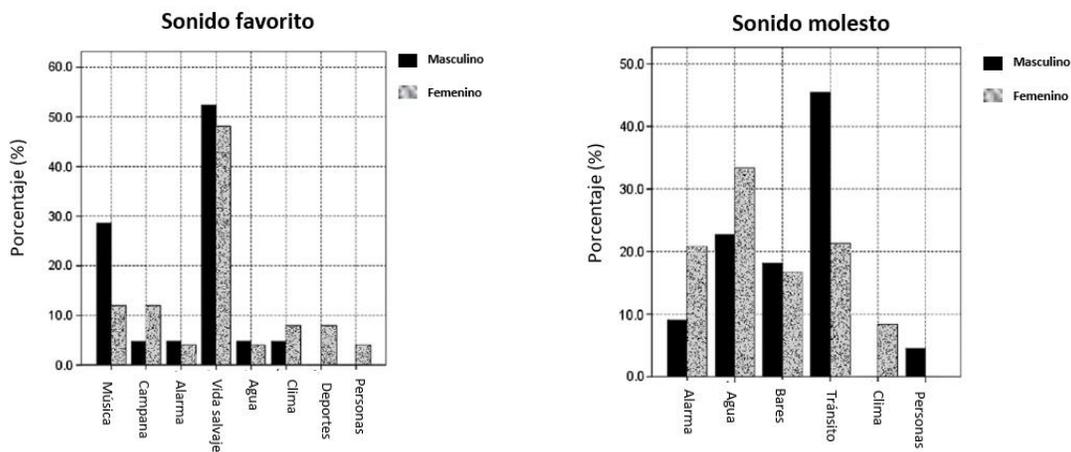


Figura 3.6. Comparación de preferencias de sonido (Liu & Kang, 2016)

Como se puede observar, existe una gran diferencia entre los sonidos que cada género considera como agradable o desagradable. Mientras que los entrevistadores del género masculino encuentran el sonido de música más agradable que las mujeres, el género femenino encuentra más molesto el sonido del agua que los hombres. Por lo que la identificación de sonidos molestos o no molestos no puede hacerse de manera mecánica.

En esa misma investigación realizada por Kang y Liu (2016), también se desarrolla el concepto de memoria de paisaje sonoro. Este término hace referencia al sonido que se queda impregnado en la memoria de las personas, y que en cierta manera tiene un efecto positivo o negativo en la elección de un sonido agradable o molesto.

Para poder ahondar más en el tema, consideraron tres tipos de memoria: positiva, especial y negativa. La memoria positiva está relacionada con la cuestión sentimental y el deseo de la persona por mantener esa sensación de alegría que sintió años atrás y está ligada con la nostalgia. La memoria especial hace referencia a sonidos que están ligados a un acontecimiento específico pero que no afectan de manera negativa o positiva a la persona. Por último, la memoria negativa está ligada con sonidos pertenecientes a eventos desagradables, como es el caso de las guerras.

A partir de estos tres tipos de memoria sonora se toma en cuenta el sentimiento hacia un paisaje sonoro, el cual se refiere al sentimiento o sensación que el paisaje sonoro actual, transmite en las personas. A partir de lo anterior, se busca que el paisaje sonoro logre trascender en el tiempo. De esta manera se busca ligar el paisaje sonoro con una situación actual y también busca que dicho ambiente logre crear una huella en el estilo de vida de las personas involucradas en el paisaje sonoro.

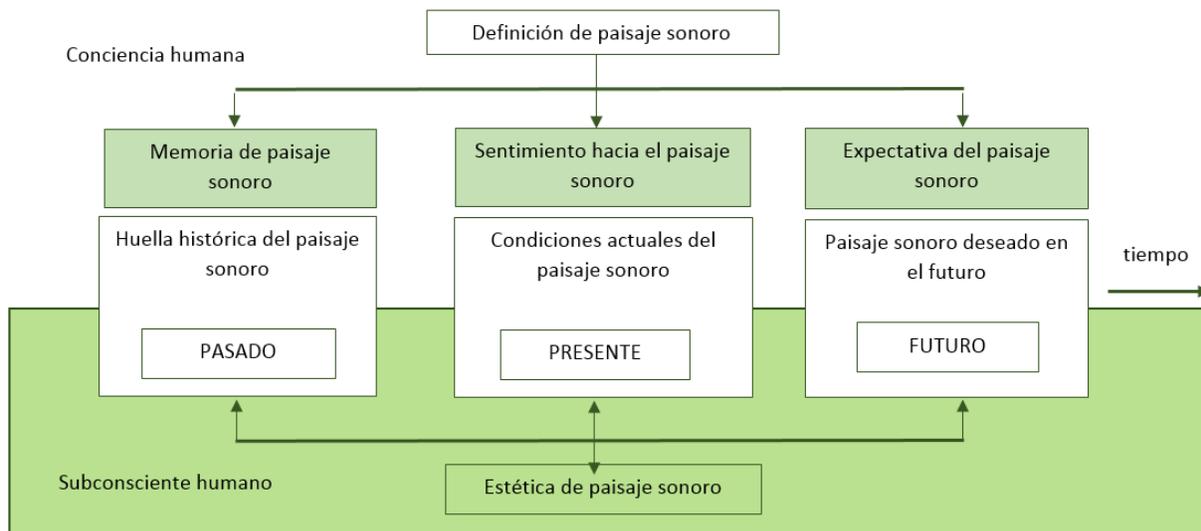


Figura 3.7. Definición de paisaje sonoro de acuerdo con la conciencia humana (Liu & Kang, 2016)

Como se puede observar, el hacer uso de un paisaje sonoro para la mitigación del ruido ambiental es un proceso bastante complejo. Ya que, como se ha mencionado, el paisaje sonoro hace uso de diversas áreas del conocimiento, por lo que el tiempo que conlleva dicho proceso es muy amplio. A pesar de que el concepto de paisaje sonoro nació hace muchos años, ha sido en los últimos años que se ha retomado el tema, por lo que aún existen muchos elementos que siguen sin desarrollarse. Pero a pesar de ello, países europeos y asiáticos han mostrado mucho interés en

el área, y gran parte de las investigaciones se han realizado en universidades provenientes de estos países.

A pesar de que el paisaje sonoro es un tema relativamente nuevo, y poco estudiado, es importante considerar esta alternativa para dar solución a las problemáticas relacionadas con el ruido ambiental en nuestro país. Tal vez el hacer uso del paisaje sonoro no sea una solución inmediata para combatir el ruido ambiental, pero puede llegar a ser una solución a largo plazo.

3.4 Medidas tradicionales de control de ruido ambiental

Control de ruido en la fuente

Este método consiste en reducir las fuerzas o elementos que generan el ruido. Este tipo de ruido tiene orígenes diferentes, ya que estos pueden ser de impacto, por frotamiento, de flujo o pueden ser generados por fuerzas mecánicas.

Para poder controlar el ruido desde la fuente, se tienen diversos métodos, los más frecuentes son: aumento en el área de impacto y revestimiento de superficies mediante el uso de materiales absorbentes de energía acústica. En el caso de que la fuente de ruido sea una maquinaria, entonces se puede llegar a sustituir un elemento de dicha maquinaria, por otro que genere menos ruido, como es el caso de la sustitución de engranajes helicoidales por engranajes radiales (Flores, 1990, pág.178). También, es muy frecuente el uso de silenciadores para la disminución de niveles acústicos.

Medidas de protección para el receptor

En el caso de que se presenten niveles altos de ruido, entonces, no solo será necesario crear alternativas para el control de ruido en la fuente, sino que también será necesario proteger al receptor de la exposición del ruido.

Para poder brindar protección al receptor, se cuenta con diferentes métodos, los más frecuentes son:

1. Uso de aparatos de protección para los oídos, los cuales pueden ser tapones y cascos.
2. Construcción o creación de una cabina que permita crear un obstáculo para que el ruido no pueda transmitirse. Este tipo de cabinas también funciona como un tipo de aislante acústico.

Control de ruido en las vías de transmisión

El control de ruido en las vías de transmisión ocurre cuando se quiere propiciar que los altos niveles de ruido, generados por una fuente, lleguen con menor impacto al receptor. Para lograr dicho objetivo, se aplican metodologías diferentes como: emplazamiento, métodos de edificación y el uso de barreras acústicas.

El método de emplazamiento consiste en mantener una distancia significativa desde el punto de mayor emisión de ruido y el receptor. Debido a que en el trayecto de la onda sonora desde la fuente hasta el receptor se tiene una disminución de la presión acústica, los niveles de ruido habrán disminuido cuando la onda sonora llegue al receptor.

El caso de los métodos de edificación se busca que el diseño de la edificación contemple el uso de materiales absorbentes o aislantes de ruido, para que las personas que hagan uso de dicha edificación se encuentren en un ambiente acústico agradable.

Por último, uno de los métodos más empleados es el uso de barreras acústicas, estas barreras acústicas consisten en paneles elaborados de diferentes materiales, ya sea acrílico, madera, metal o cualquier otro material sólido. El objetivo de estas barreras acústicas es crear un tipo de muralla la cual permite que el sonido llegue al receptor en niveles menores. El diseño y el funcionamiento de estas barreras de sonido es bastante complejo. Por lo que el desarrollo de este trabajo está basado en el funcionamiento de estas barreras como método de atenuación de ruido ambiental.

3.5 Barreras acústicas

A partir de los años 60, en el Reino Unido, se comenzaron a colocar barreras acústicas, especialmente en localidades cercanas a carreteras. Estas barreras acústicas, eran elaboradas con suelo o tierra, lo cual generaba un aspecto natural pero visualmente, poco agradables. Por ello, surgió la necesidad de crear barreras con aspecto más estético, pero que lograran reducir los niveles acústicos (English, 2001,pág. 2).

De esta manera, se emprendieron investigaciones para determinar el comportamiento de las ondas sonoras al interactuar con las barreras acústicas, se experimentó con diferentes materiales y geometrías con el objetivo de obtener barreras más eficientes.

De acuerdo con Flores Pereita (1990), la atenuación sonora que proporcionan las barreras acústicas está directamente relacionada con las dimensiones de la barrera, el espectro del ruido, el material de construcción de la barrera, las características acústicas del lugar en donde se colocará la barrera, además de la relación entre el emisor y el receptor.

En términos generales, el funcionamiento de las barreras acústicas consiste en la difracción de las ondas sonoras que inciden en la barrera. Esto ocasiona que se presenten diferentes niveles

de atenuación a diferentes frecuencias. Lo anterior, genera una zona de sombra acústica, tal como se muestra en la figura 3.8.

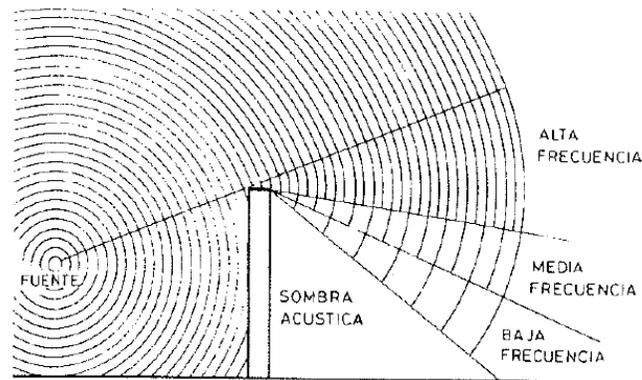


Figura 3.8. Onda sonora incidente a una barrera acústica (Flores, 1990)

Para poder calcular la atenuación acústica debido a la presencia de una barrera sonora, se hace uso del método propuesto por Maekewa, el cual consiste en calcular el número de Fresnel, el cual se obtiene a partir de las ecuaciones 20 y 21:

$$\delta = A + B - d \quad (20)$$

En donde:

δ = camino preferencial

A = distancia entre la fuente y el punto más alto de la barrera

B = distancia entre el receptor y el punto más alto de la barrera

d = distancia entre la fuente y el receptor

A continuación, se presenta una figura que permite visualizar, la manera en la se obtienen cada una de las distancias para obtener el camino preferencial (δ).

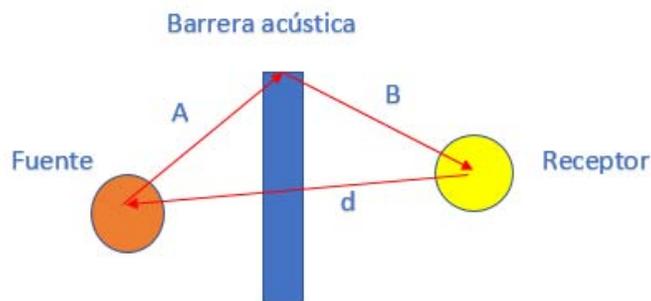


Figura 3.9. Obtención del camino referencial δ .

Para obtener el número de Fresnel, se hace uso de la ecuación 21:

$$N = 2 \frac{\delta}{\lambda} \quad (21)$$

En donde:

N = número de Fresnel

λ = longitud de la onda sonora

δ = camino preferencial

Cabe mencionar que el camino preferencial va a ser positivo o negativo, según el posicionamiento de la fuente y del receptor. Si la fuente y el receptor no se encuentran en línea visual directa, entonces δ será positivo. En el caso de que la fuente y el receptor se encuentren en línea visual directa, entonces δ será negativo.

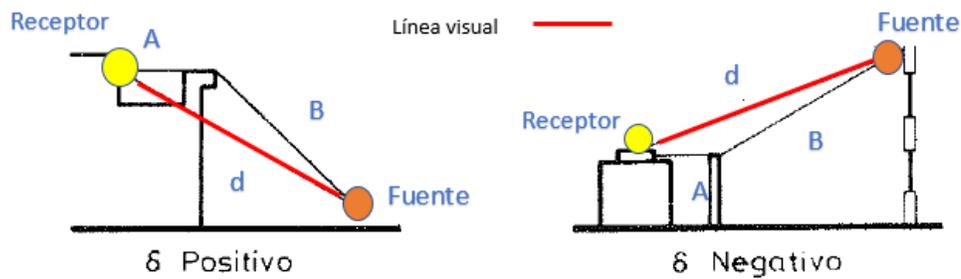


Figura 3.10. Línea visual para δ .

Una vez obtenido el número de Fresnel, se tienen dos alternativas para obtener los niveles de atenuación: el primer método, es el propuesto por Maekewa, el cual es un método gráfico, y el segundo método está dado por ecuaciones propuestas por Kurze y Anderson.

El método propuesto por Maekewa, consiste en una gráfica en donde en el eje de las x, se tienen diferentes valores de número de Fresnel, y en el eje de las y, se tiene la atenuación acústica en dB. En la 3.11, se muestra dicha gráfica.

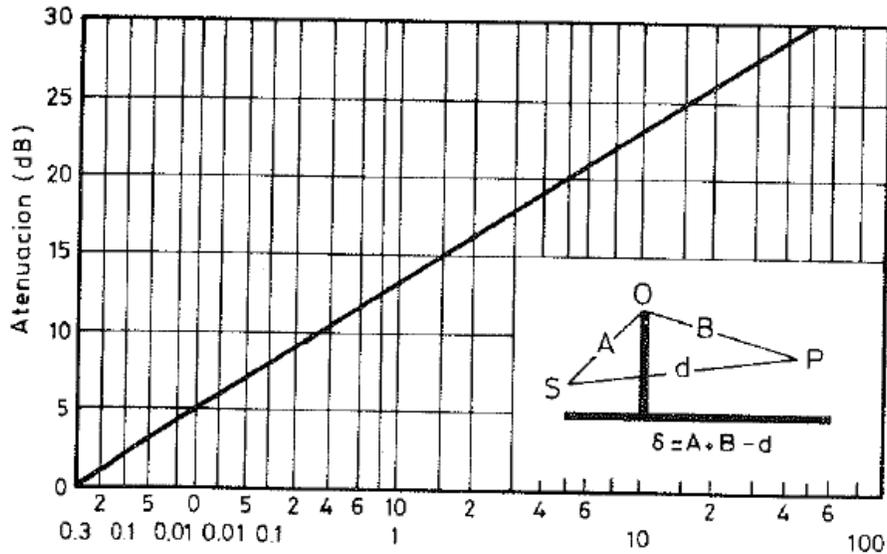


Figura 3.11. Gráfica de atenuación acústica (Flores, 1990)

Como ya se ha mencionado, el segundo método consiste en resolver las expresiones matemáticas propuestas por Kurze y Anderson (English, 2001, pág. 37), las cuales son:

$$IL = 5 + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}} \text{ dB} \quad \text{Para } -0.2 < N < 12.5 \quad (22)$$

$$IL = 24 \text{ dB} \quad \text{Para } N > 12.5 \quad (23)$$

También se puede calcular la atenuación acústica con base a la altura efectiva de la barrera. Este método es efectivo en el exterior y en espacios que cuenten con coeficientes de absorción elevados. Este método es gráfico, por lo que se refieren de tres valores: la longitud de onda, la altura efectiva y el ángulo de pantalla. En las figuras 3.12 y 3.13, se presenta cómo obtener cada uno de los valores.

Tabla 3.4. Longitud de onda para determinadas frecuencias λ .

Frec. Hz	31.5	63	12.5	250	500	Frec kHz	1	2	4	8	16
M	10.88	5.44	2.72	1.36	0.68	M	1	2	4	8	16
ft	36	18	9	4.5	2.2	Ft	0.34	0.34	0.17	0.09	0.02

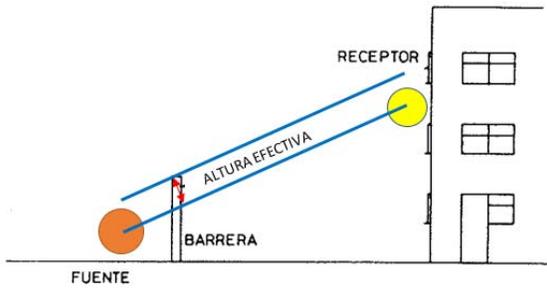


Figura 3.12. Obtención de la altura efectiva h_e .

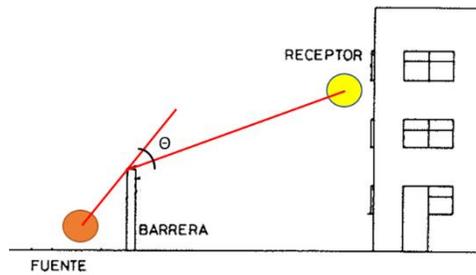


Figura 3.13. Obtención del ángulo de pantalla θ

Una vez obtenidos los datos de longitud de onda, la altura efectiva y el ángulo de pantalla es necesario resolver la siguiente relación:

$$\frac{\text{altura efectiva}}{\text{longitud de onda}} = \frac{h_e}{\lambda} \quad (24)$$

Para poder determinar el nivel de atenuación considerando la altura de efectiva de la barrera, se hace uso de la gráfica mostrada en la figura 3.14:

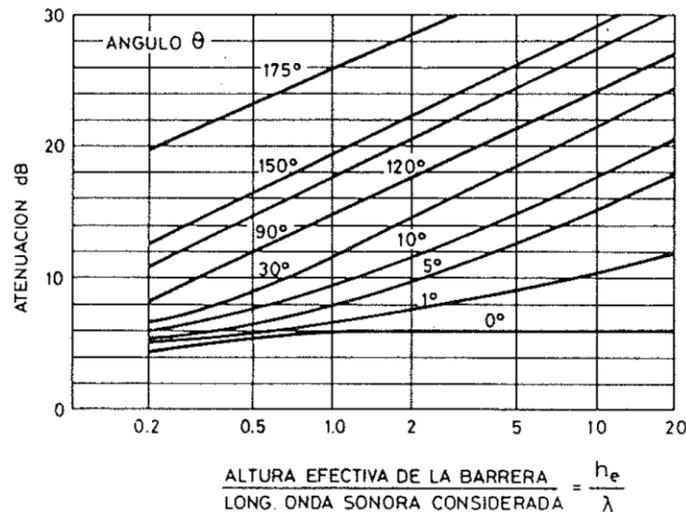


Figura 3.14. Gráfica de atenuación acústica de una barrera, tomando en cuenta la altura efectiva de la barrera (Flores, 1990)

Como se ha podido observar, la atenuación acústica obtenida por los métodos mostrados no considera el material con el que están elaboradas las barreras acústicas, solamente consideran a las ondas sonoras que han sido difractadas por la barrera. Sin embargo, el hecho de que ciertas barreras acústicas estén elaboradas con ciertos tipos de materiales proporciona una mayor eficiencia en la mitigación de ruido.

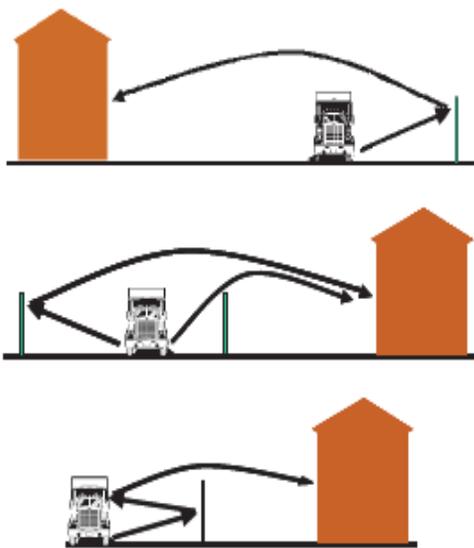
En el caso de las barreras acústicas, el material con el cual están elaboradas está sumamente ligado con el tipo o la función de la mismas. En términos generales, existen tres tipos de barreras: reflexivas, absorbentes y reactivas (English, 2001, pág. 95).

Barreras reflexivas

Este tipo de barreras hacen uso del fenómeno de reflexión sonora, fenómeno que se presenta cuando una onda de sonido choca con un obstáculo. Una parte de la energía se va a transmitir y la otra se va a reflejar. A su vez, la onda que ya ha sido reflejada puede volver a encontrarse con un segundo obstáculo. En la figura 3.15 se puede observar el fenómeno de reflexión en barreras acústicas, considerando diversos casos.

El hecho de que se presenten diversos fenómenos de reflexión no sólo tiene que ver con la colocación de la barrera dentro de la vialidad, la superficie de la barrera también juega un papel importante.

Cuando la barrera tiene una superficie lisa, la onda sonora que incide en la barrera se reflejará



en el mismo ángulo con la cual incidió la onda. En caso de que se tenga presencia de superficies rugosas o irregulares, el sonido se reflejará en diferentes direcciones, generándose un campo sonoro, el cual es la manera en que el sonido se distribuye dentro de un espacio y en diferentes puntos del mismo.

La superficie de las barreras reflexivas está dada por el material con el cual están construidas, generalmente, este tipo de barreras están construidas por concreto, acrílico, PVC, fibra de vidrio y en algunas ocasiones de láminas de aluminio. Otra manera de poder identificar una barrera reflexiva es que ésta usualmente es opaca o transparente, como las se muestran en la figura 3.16.

Figura 3.15. Reflexión sonora en barreras reflexivas (Hans, 2016)



Figura 3.16. Barreras de lámina de aluminio (izq.) y de concreto (der) (English, 2001)

Barreras absorbentes

Este tipo de barreras funcionan haciendo uso del fenómeno de absorción acústica. Estas barreras tienen la característica de ser opacas y de contener elementos porosos, los cuales absorben el ruido.

Generalmente, este tipo de barreras están elaboradas con madera, acero, láminas de aluminio y tabiques. Sin embargo, cada material tiene mayor o menor eficiencia en cuanto a absorción. En la tabla 3.5 se presenta coeficientes de absorción acústica de diversos materiales.

Tabla 3.5. Coeficientes de absorción acústica de diferentes materiales. (Carrión Isbert, 1998)

Material	Frecuencia [Hz]					
	125	250	500	1000	2000	4000
Tabique de barro comprimido	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.07
Tablero de triplay de 9 [mm]	0.28	0.22	0.17	0.09	0.10	0.11
Corcho	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02
Fibra de vidrio de 25 [mm]	0.05	0.08	0.60	0.93	0.99	0.96

En la figura 3.17, se muestran algunos ejemplos de barreras acústicas absorbentes.



Figura 3.17. Barreras de madera (izq) y de lámina de acero (der). (English,2001)

Barreras reactivas

Las barreras reactivas son aquellas que contienen cavidades o resonadores que tienen el propósito de atenuar el ruido a frecuencias específicas. El funcionamiento de estas barreras consiste en que el sonido entra en las cavidades a través de pequeños orificios en la superficie de la barrera (English, 2001, pág. 97). En la figura 3.18, se presenta un esquema de barreras reactivas.

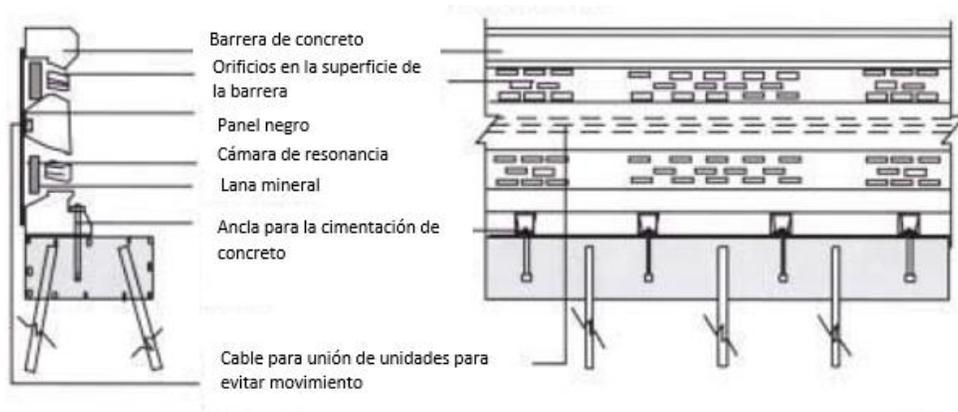


Figura 3.18. Corte transversal y longitudinal de una barrera reactiva (English, 2001)

Barreras verdes

Otro tipo de barreras acústicas son precisamente las barreras verdes. Este tipo de barreras hacen uso de vegetación para la atenuación de ruido ambiental. El uso de vegetación puede ser mediante la plantación de árboles, arbustos, fachadas verdes o barreras acústicas elaboradas con vegetación, entre otros.

Las barreras verdes en zonas urbanas no solo tienen la finalidad de atenuar las emisiones de ruido, sino que también juega un papel importante en la cuestión estética y ecológica. Estudios realizados por el proyecto HOSANNA llegaron a la conclusión de que a pesar de que la vegetación reduce los niveles de ruido hasta 3 dB en una fachada o en una barrera, el conjunto de estos elementos puede proporcionar beneficios a largo plazo (Nilsson, Bengtsson, & Klaeboe, 2014, pág. 15).

4. Uso de vegetación para la atenuación de ruido

4.1 Comportamiento del sonido en vegetación

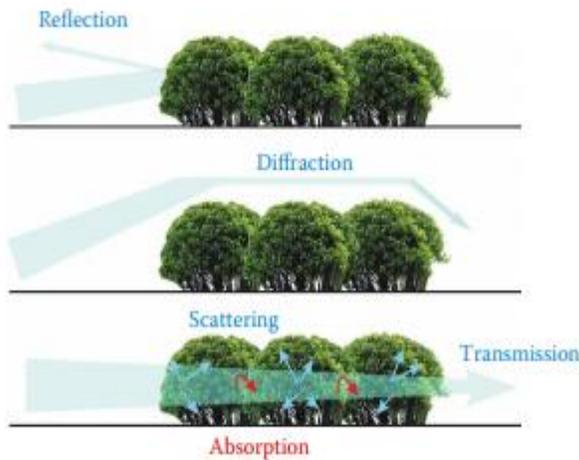


Figura 4.1. Interacción directa entre las ondas sonoras y la vegetación (Nilsson et al., 2014)

La interacción entre las ondas sonoras y la vegetación puede ocurrir ya sea de manera directa o indirecta. Los efectos directos abarcan la redistribución y la absorción de la energía sonora, tal como se muestra en la figura 4.1.

La redistribución de las ondas sonoras se presenta de tres maneras: reflexión, difracción y difusión. En el caso de la absorción, ésta se debe a efectos termodinámicos. Estos efectos termodinámicos se traducen en pérdida de energía de la onda sonora debido a una transferencia de calor que se presenta.

En el caso de los efectos indirectos, éstos se le atribuyen a una acción secundaria dentro de un sistema planta-suelo. Esto hace referencia a cambios en la densidad del aire, la velocidad del viento, el incremento de la temperatura ambiente, entre otros. Pero en este caso, sólo se abordarán los temas relacionados con la disminución del ruido a debido a los efectos directos.

4.2 Absorción del ruido en vegetación

En la absorción de ruido debido a vegetación se presentan dos fenómenos físicos. El primer fenómeno se presenta en la interfase entre la vegetación y el aire, generando así, efectos termoviscosos los cuales van a permitir que la vegetación absorba el ruido. El segundo fenómeno físico se presenta cuando las ondas sonoras pierden gran parte de su energía debido a la vibración que ocasionan las ondas sonoras en la vegetación. Una parte de la energía que entró en vibración en la vegetación es retransmitida hacia el aire. La otra parte de esta energía será “desechada” por las partes más rígidas de la vegetación (troncos, ramas, suelo entre otras). De esta manera, gran parte de la energía que generan las ondas sonoras es perdida debido a la transferencia de calor, tal y como se muestra en la figura 4.2.

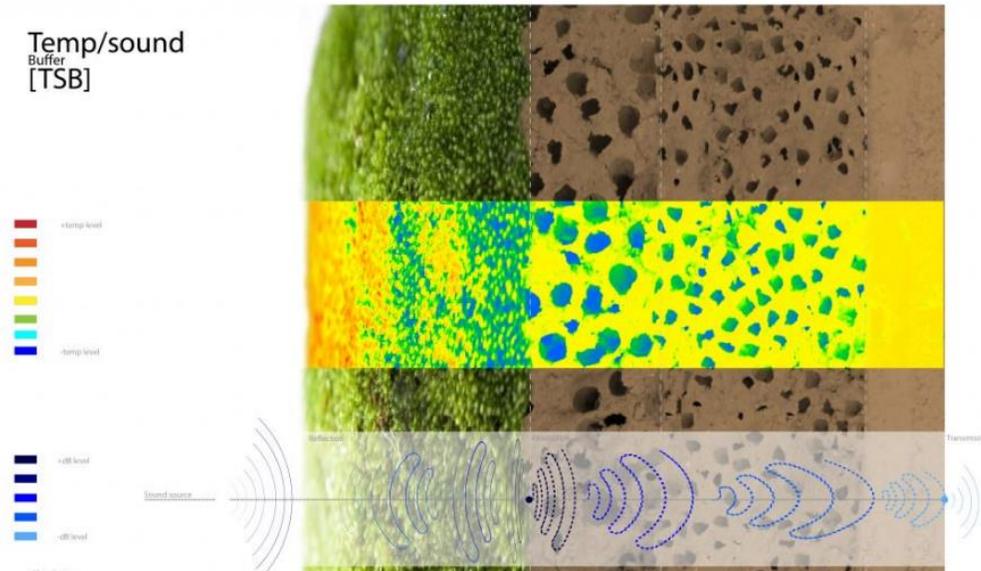


Figura 4.2 Pérdida de energía de las ondas sonoras debido a la transferencia de calor.
Fuente: <http://www.iaacblog.com/>, tomada 2017

Como se puede observar en la figura 4.2, en la parte izquierda se muestran dos escalas. La primera es una escala de temperatura, acomodada de manera descendente: el color rojo representa una temperatura “máxima” y el color azul una temperatura “mínima”. La segunda escala, la cual se encuentra en la parte inferior izquierda, muestra (también de manera descendente) los niveles de decibeles, siendo el color más oscuro los decibeles “máximos” y el recuadro más claro los decibeles “mínimos”.

Al hacer una interpretación de la figura 4.2, conforme las ondas sonoras inciden en la vegetación, se tienen mayores niveles de sonido en la superficie de la planta, presentándose una mayor temperatura y como consecuencia, una pérdida de energía mayor. Conforme las ondas sonoras van penetrando la planta, se tienen menores niveles de ruido y temperatura, ya que una parte de la energía ya fue absorbida en la superficie de la planta.

Coefficientes de absorción acústica en vegetación

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, el coeficiente de absorción acústica representa la efectividad de un objeto de absorber o no el sonido. En el caso de la vegetación, se han realizado diversos estudios para identificar si presentan propiedades acústicas o no.

Al igual que cualquier otro material, la capacidad de las plantas para absorber o no el sonido va a depender de las características físicas de la misma. Generalmente, cuando se tienen mayores frecuencias, se tendrán valores de absorción mayores. Sin embargo, lo anterior no siempre se cumple, ya que a veces las características físicas de cierto tipo de vegetación ocasionan que, a

frecuencias mayores, la planta absorba menor cantidad de ruido. Muestra de ello, son las siguientes gráficas de la figura 4.3 de ciertas especies de plantas.

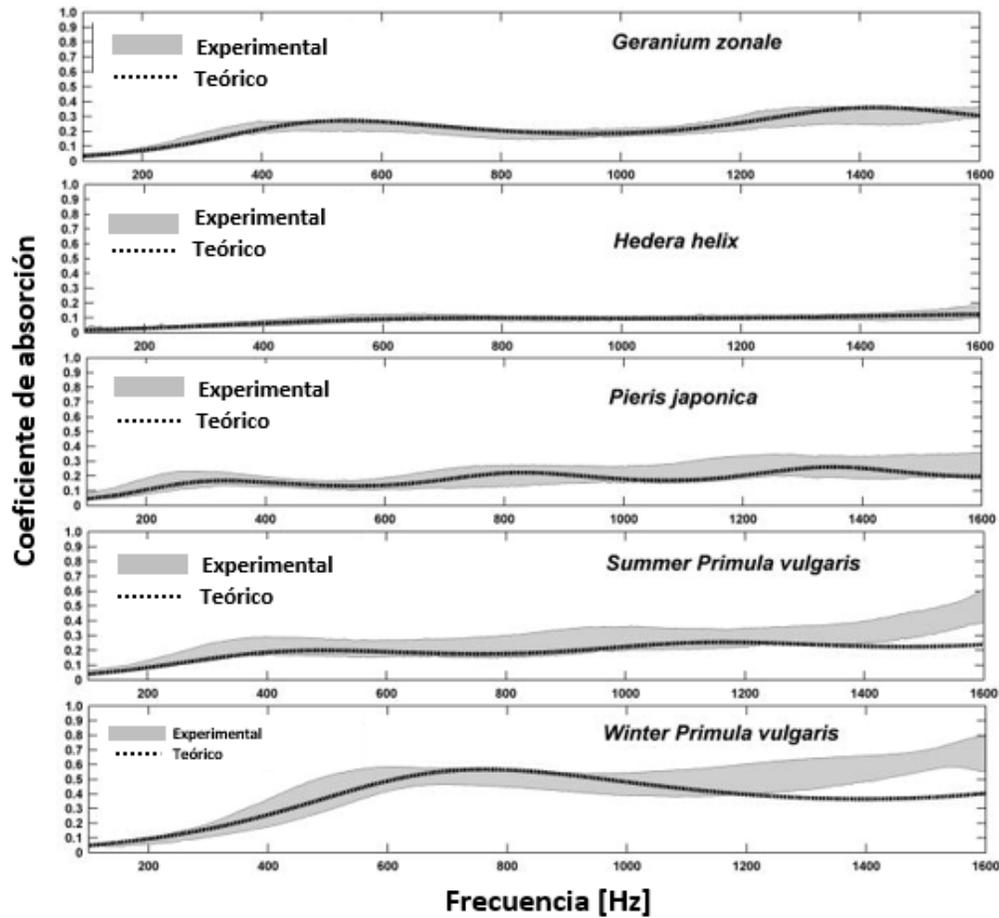


Figura 4.3. Coeficientes de absorción de algunas plantas a diferentes frecuencias (Nilsson et al., 2014)

Como se muestra en la figura 4.3, la última muestra de planta, la cual corresponde a planta de nombre “Primavera”, se tiene una mayor absorción acústica en presencia de frecuencia de valores que oscilan entre los 600 y 900 Hertz. Caso contrario a la primera muestra que corresponde al Geranio, en donde se tiene una mayor absorción acústica cuando se presentan frecuencias de 1400 Hertz.

4.3 Redistribución sonora

Reflexión sonora

Cuando se llevan a cabo estudios de acústica en vegetación, se toman datos de las características morfológicas de los especímenes a estudiar. Estas características morfológicas abarcan desde el

grosor promedio de una hoja de una planta, el peso, área, número de hojas por planta y el ángulo dominante de orientación.

De acuerdo con investigaciones realizadas por el proyecto HOSSANNA (2014), se llega a la conclusión de que, dependiendo de estas características morfológicas, se tendrá una mayor o menor absorción de ruido y por lo tanto una menor o mayor reflexión de sonido. Si se recuerda la fórmula para la obtención del coeficiente de absorción acústica, es necesario conocer la intensidad acústica que ha sido reflejada. Por lo tanto, la intensidad de ruido absorbido está relacionada con la intensidad de sonido que ha sido reflejado.

Las barreras verdes acústicas colocadas en carreteras son un claro ejemplo de cómo se comportan las reflexiones de una onda sonora al encontrarse con un obstáculo. Generalmente, estas barreras están construidas de algún material aislante de ruido (metacrilato, concreto, madera entre otras), y adicionalmente se coloca vegetación. Cuando una onda acústica choca con una barrera verde, en primera, una parte de la energía acústica será absorbida por la vegetación, y otra parte será reflejada. La energía que ha sido reflejada se comportará de tres maneras de igual manera que una barrera acústica reflexiva.

También se han colocado cinturones de árboles a lo largo de las carreteras para reducir el ruido generado por el tránsito vehicular. En este caso, la reducción de ruido se presentará debido a cuatro fenómenos: la absorción de la energía acústica debido a las hojas, la reflexión de las ondas sonoras al incidir con los troncos de los árboles, la dispersión y la difracción del sonido debido a otros elementos de los árboles. Estos dos últimos fenómenos serán abordados más adelante.

Difracción sonora

La difracción sonora es una propiedad física de las ondas sonoras, la cual implica que, al existir un obstáculo en la trayectoria de la onda acústica, ésta se vea obligada a rodear dicho obstáculo. La difracción sonora, también puede presentarse en presencia de aberturas dentro de la misma barrera u obstáculo. En este caso, la difracción de la onda sonora dependerá del tamaño de la abertura.

En el caso de áreas verdes o vegetación, la difracción no se presenta en una zona en donde se cuenta con follaje denso (hojas y ramas), sino que se presentará en la cima o en los lados de la misma. Por ello, si una persona se encuentra en el centro de un área verde, ésta llegará a percibir sonido debido a que las ondas sonoras rodearon la vegetación y no lograron ser absorbidas o reflejadas por la misma.

En el caso de difracción, ésta se va a producir a bajas frecuencias sonidos graves y disminuirá de manera gradual conforme la frecuencia aumente. Lo anterior ocasionará que las frecuencias bajas se perciban de manera más notoria (Isbert, 1998, pág. 116).

Difusión sonora

La difusión sonora es un fenómeno que se presenta cuando una onda sonora choca con un obstáculo ocasionando una pérdida de energía. A su vez, las ondas sonoras que ya han perdido su energía buscan retransmitirse ya sea a través de una abertura dentro del mismo obstáculo o rodeando dicho obstáculo (difracción).

En el caso de la vegetación, cuando una onda sonora incide sobre ésta, se presentará el fenómeno de difusión sonora en diversas ocasiones. Esto se debe a que al incidir una onda sonora con los diversos elementos de una planta (hojas, ramas, y troncos), el sonido cambiará la dirección de propagación. La onda sonora, al cambiar de dirección, volverá a difundirse a través de los elementos de la vegetación que estén más cercanos. Como resultado, se pierde energía durante la trayectoria de la fuente sonora hasta el receptor, ocasionando que los niveles de presión sonora que percibe el receptor sean menores.

La difusión sonora es muy estudiada en el área de acondicionamiento acústico en recintos cerrados. Como resultado de dichos estudios, se tienen los difusores acústicos, los cuales son empleados para que en el momento de que una onda sonora incida sobre el difusor, el sonido se disperse de manera homogénea en todo el recinto. El uso principal de estos difusores es crear un sonido envolvente que sea agradable para el receptor y así, poder brindar una acústica de calidad dentro del recinto. Otro de los usos de los difusores es el eliminar anomalías sonoras como ecos, focalizaciones del sonido entre otros.

En los últimos años, se ha hecho experimentación con vegetación para que sea empleada como difusor. Para ello, se ha hecho uso del coeficiente de difusión acústica para poder determinar que especies de plantas dispersan el sonido de mejor manera. La obtención de un coeficiente de difusión también permite entender de qué manera se dispersa el sonido en un espacio. Esto es de gran importancia en barreras verdes o paredes verdes que son colocadas en las fachadas de edificios, ya que es necesario conocer el efecto del sonido sobre estas barreras.

Para poder medir la eficiencia de un elemento (en este caso de cierto tipo de vegetación) para difundir el sonido, se hace uso del coeficiente de difusión. Este puede entenderse como la fracción de energía acústica que ha sido reflejada en una manera no especular

En la tabla 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 se presentan los coeficientes de difusión acústica de diferentes especies de plantas (Smyrnova et al., 2012).

Tabla 4.1 Coeficiente de difusión para Buxus a diferentes frecuencias y densidades (Smyrnova et al., 2012)

Tipo de planta: Buxus (Boje)								
Densidad	Frecuencia [Hz]							
	100	250	400	1000	1600	2500	4000	5000
20%	0.02	0.00	0.03	0.00	0.00	0.015	0.11	0.06
40%	0.01	0.03	0.025	0.01	0.03	0.02	0.13	0.11
60%	0.01	0.00	0.03	0.01	0.15	0.02	0.16	0.2
80%	0.01	0.00	0.03	0.01	0.15	0.03	0.17	0.11
100%	0.01	0.03	0.025	0.01	0.09	0.05	0.018	0.26

Tabla 4.2. Coeficientes de difusión para Acebo a diferentes frecuencias y densidades (Yang et al., 2013)

Tipo de planta: Acebo								
Densidad	Frecuencia [Hz]							
	100	250	400	1000	1600	2500	4000	5000
20%	0.01	0.00	0.02	0.015	0.015	0.025	0.07	0.06
40%	0.01	0.00	0.015	0.02	0.00	0.025	0.12	0.1
60%	0.06	0.01	0.02	0.01	0.025	0.11	0.18	0.175
80%	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.1	0.21	0.31
100%	0.00	0.01	0.02	0.015	0.015	0.12	0.18	0.36

Tabla 4.3. Coeficientes de difusión para Hiedra a diferentes frecuencias y densidades (Yang et al., 2013)

Tipo de planta: Hedera (Hiedra)								
Densidad	Frecuencia [Hz]							
	100	250	400	1000	1600	2500	4000	5000
25%	0.08	0.00	0.01	0.02	0.03	0.17	0.22	0.27
50%	0.03	0.09	0.01	0.10	0.18	0.35	0.40	0.30
100%	0.015	0.04	0.01	0.19	0.24	0.41	0.39	0.30

Tabla 4.4. Coeficientes de difusión para Brezo a diferentes frecuencias y ángulos de incidencia (Smyrnova et al., 2012)

Tipo de planta: Brezo							
Ángulo de incidencia	Frecuencia [Hz]						
	500	1000	1250	2000	2500	3150	4000
45°	0.14	0.33	0.35	0.29	0.47	0.55	0.63
60°	0.23	0.16	0.31	0.32	0.28	0.26	0.27
90°	0.51	0.48	0.48	0.50	0.35	0.40	0.54

Tabla 4.5. Coeficientes de difusión para Pensamiento a diferentes frecuencias y ángulos de incidencia (Smyrnova et al., 2012)

Tipo de planta: Pensamiento							
Ángulo de incidencia	Frecuencia [Hz]						
	500	1000	1250	2000	2500	3150	4000
45°	0.16	0.33	0.27	0.23	0.22	0.32	0.35
60°	0.06	0.26	0.29	0.39	0.31	0.34	0.37
90°	0.41	0.36	0.30	0.39	0.31	0.35	0.36

Otra manera de poder representar la difusión en la vegetación es a través de diagramas de respuesta polar, los cuales permiten observar la manera en que se difunde el sonido en el espacio. En las figuras 4.4 y 4.5 se presentan algunos de estos diagramas de respuesta polar.

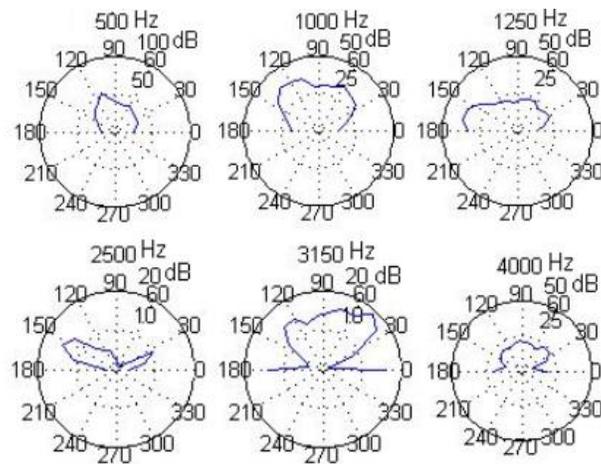


Figura 4.4. Diagrama de respuesta polar para brezo con sonido incidente a 45° (Smyrnova et al., 2012)

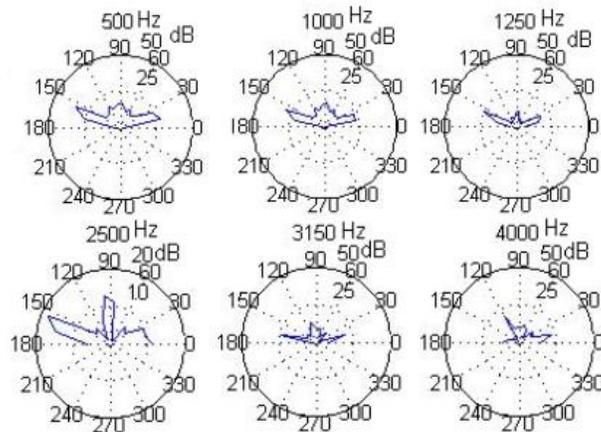


Figura 4.5. Diagrama de respuesta polar para pensamiento con sonido incidente a 90° (Smyrnova et al., 2012)

4.4 Arreglo de vegetación a pie de carretera

Otro tipo de estudios también han arrojado que de acuerdo con el acomodo de la vegetación se pueden obtener resultados óptimos para la atenuación de ruido. En una investigación realizada en Valencia, se encontró que si diferentes tipos de árboles cuentan con un arreglo adecuado se puede lograr una mayor atenuación en diversas frecuencias.

De acuerdo con Martínez-Sala (2006), una manera de poder incrementar la eficiencia de atenuación de ruido es mediante un acomodo de la vegetación como cristales sónicos.

Los cristales sónicos pueden entenderse como un objeto que tiene densidad y/o elasticidad periódica. La función de estos cristales sónicos es reflejar las ondas incidentes a las ondas entre el aire y el material del cual están formados los cristales (Zahn, Scoccola, & Szewc, 2015, pág.1)

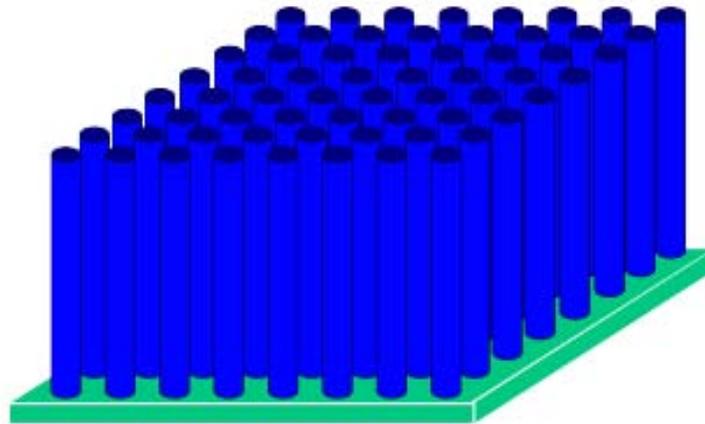


Figura 4.6. Cristal sónico 2D (Zahn et al., 2015)

Regresando al estudio realizado por Martínez-Sala (2006), se realizaron tres tipos de arreglos con diferentes tipos de árboles. El primer arreglo se consideró en forma de triángulo, el segundo en rectángulo y el tercero haciendo uso de filas múltiples de árboles, tal y como se muestra en la figura 4.7.

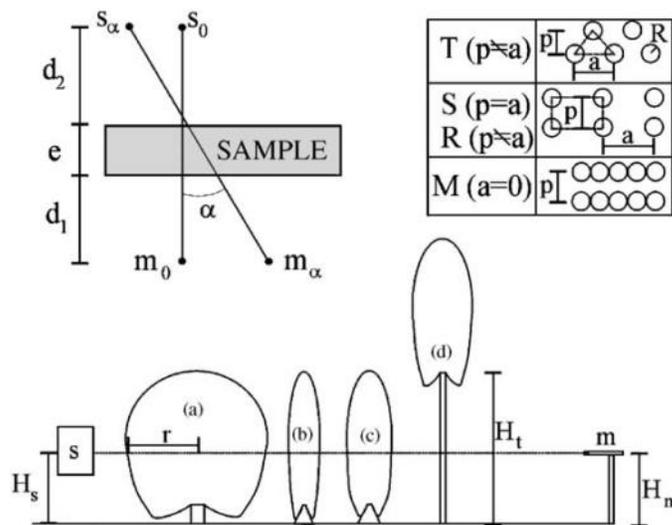


Figura 4.7. Arreglo geométrico de cada uno de los cristales sónicos creados con árboles (Martínez-Sala et al., 2006)

A las conclusiones a las llegan es que a bajas frecuencias se logra conseguir atenuaciones de mayores que cuando se hace el análisis con cinturones de árboles o dentro de un bosque. Además, el jugar con diferentes alturas y frondas de árboles se puede obtener un comportamiento similar al de unos cristales sónicos.

Otro estudio también llegó a la conclusión que, de acuerdo con el diámetro del tronco, también se puede lograr mayor o menor atenuación. El investigador Van Renterghem (2014), elaboró una gráfica que permite visualizar la relación entre la atenuación con respecto al diámetro de tronco, la cual se muestra en la figura 4.8.

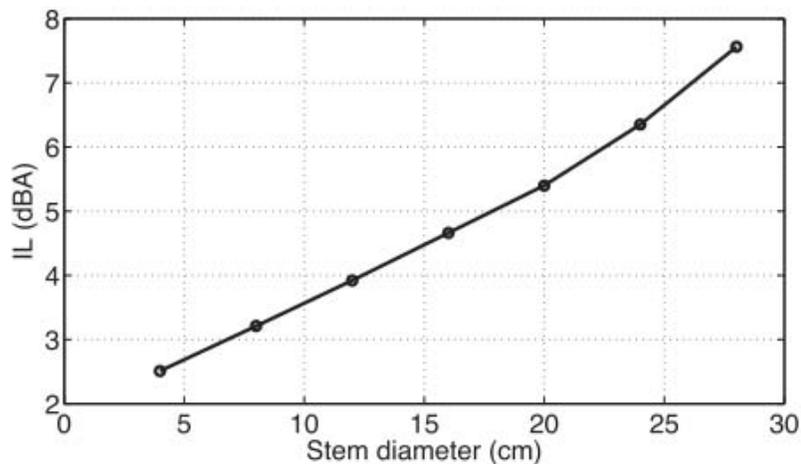


Figura 4.8. Atenuación con respecto al diámetro del tronco (Van Renterghem, 2014)

4.5 Otras ventajas de la presencia de áreas verdes en ciudades

Muchos han sido los estudios que se han llevado a cabo relacionados con el uso y la presencia de áreas verdes dentro de áreas urbanas. Y a su vez, los resultados de dichos estudios han permitido determinar qué tan benéfica es la presencia de áreas verdes dentro de un área urbana. Si bien, uno de estos beneficios es la reducción del ruido, también existen otras ventajas como la reducción de la huella de carbono, purificación del aire, disminución de la isla de calor presente en una ciudad, entre otros fenómenos. Por ello, se presentan diversos impactos positivos que genera la presencia de barreras, fachadas, parques y elementos vegetales dentro de una ciudad.

Mejoramiento de la calidad del aire

Como bien sabemos, una de las problemáticas que presentan las grandes ciudades es la mala calidad del aire. La emisión constante de gases provenientes de vehículos y fábricas, y la falta de

vegetación, son la combinación perfecta para que la calidad de aire dentro de una ciudad no sea la más adecuada para aquel que habite en ella. Para ello, el mejoramiento de la calidad del aire puede hacerse a través de la presencia de vegetación dentro de una ciudad. Mediante un diseño y manejo adecuado, estas áreas verdes pueden ser empleadas como “biotecnología” natural (Nowak, 2006).

Para poder evaluar el mejoramiento de la calidad del aire o la cantidad de polución que es removida debido a la presencia de áreas verdes, se hace uso de la ecuación 25:

$$F = V_d C \quad (25)$$

En donde:

F = flujo del contaminante en g/m²s

V_d = velocidad de deposición en m/s

C = Concentración del contaminante en g/m³

A su vez, para poder calcular la velocidad de deposición se hace uso del inverso de la suma de la resistencia aerodinámica, la capa límite cuasi-laminar y la resistencia de superficie, tal y como se muestra en la ecuación 26:

$$v_d = \frac{1}{R_a + R_b + R_c} \quad (26)$$

En donde:

v_d = velocidad de deposición en m/s

R_a = Resistencia aerodinámica s/m

R_b = Capa límite cuasi laminar s/m

R_c = Resistencia de superficie s/m

En el caso de la resistencia aerodinámica, esta hace referencia a la resistencia al transporte desde el entorno circundante a la hoja a la atmósfera libre (Martín de Santa Olalla, López Fuster, & Calera Belmonte, 2005). En otras palabras, la resistencia aerodinámica es la resistencia entre la cubierta de la hoja de una planta y la atmósfera y está sumamente ligada con la turbulencia atmosférica. La resistencia de capa límite cuasi laminar esta influenciada por la difusividad del material que va a ser transportado. Por último, el coeficiente de resistencia de superficie hace referencia a la resistencia al flujo de vapor durante un proceso de transpiración y evaporización.

A pesar de que la velocidad de deposición es representada a través de una ecuación relativamente sencilla, la obtención de cada una de las resistencias es bastante complicada, ya que muchas de estas resistencia dependen del tipo de vegetación, además de que cada una de las resistencias también dependen de diferentes factores como temperatura, rugosidad de la cubierta de la hoja, entre otras.

Los primeros estudios relacionados con el almacenamiento de carbono debido a la presencia de árboles urbanos se llevaron a cabo en las ciudades de Oakland y Chicago (Nowak & Crane, 2002). A partir de dichos estudios, se desarrolló un modelo denominado UFORE (Urban Forest Effects), el cual permite cuantificar la estructura y la función de un área forestal. Este programa fue diseñado para estandarizar un protocolo para la recolección y el análisis de información relacionada con áreas urbanas.

El modelo UFORE, permite calcular diversas funciones relacionadas con los efectos de árboles en cuanto a la contaminación del aire, uso de energía en edificaciones y gases tipo invernadero. El funcionamiento de este modelo hace uso de información de campo de “bosques urbanos” escogidos aleatoriamente, además de las emisiones de gases por hora e información meteorológica. Esto permite que UFORE cuantifique la densidad de áreas verdes, área de la hoja, la biomasa de un árbol, la cantidad de polución del aire removida debido a la presencia de vegetación y la cantidad de mejoramiento del aire a lo largo de un año.

En un artículo publicado por Nowak (2006), se presenta una tabla en donde se puede observar la cantidad de contaminantes que son retenidos a través de la vegetación haciendo uso de este modelo UFORE. Dicha tabla muestra los diferentes contaminantes que fueron removidos por la vegetación, así como el costo promedio anual por hectárea, de remoción de dichos contaminantes en dólares.

Tabla 4.6 Remoción de contaminantes debido a la presencia de vegetación (Nowak, 2006)

City	Pollution removed						Range (t)	g/m ² cover ^a	\$ (USD)	\$/ha cover ^b
	CO (t)	NO ₂ (t)	O ₃ (t)	PM10 (t)	SO ₂ (t)	Total (t)				
New York, NY	67	364	536	354	199	1521	(619–2185)	9.1	8,071,000	482
Atlanta, GA	39	181	672	528	89	1508	(538–2101)	12.0	8,321,000	663
Beijing, China ^c	na	132	256	772	101	1261	na	27.5	6,264,000	1223
Toronto, Canada ^d	33	199	405	284	77	997	(383–1394)	7.7	5,512,000	425
Baltimore, MD	9	94	223	142	55	522	(183–725)	9.9	2,876,000	545
Philadelphia, PA	10	93	185	194	41	522	(203–742)	9.7	2,826,000	527
Washington, DC	18	50	152	107	51	379	(150–568)	8.3	1,956,000	429
Boston, MA	6	48	108	73	23	257	(94–346)	8.1	1,426,000	447
Woodbridge, NJ	6	42	66	62	15	191	(72–267)	10.8	1,037,000	586
San Francisco, CA	7	25	47	42	7	128	(51–195)	9.0	693,000	486
Moorestown, NJ	2	14	43	38	9	107	(41–157)	10.1	576,000	541
Syracuse, NY	2	12	55	23	7	99	(37–134)	6.6	568,000	378
Morgantown, WV	1	5	26	18	9	60	(22–98)	7.5	311,000	387
Jersey City, NJ	2	9	13	9	5	37	(16–56)	8.4	196,000	445
Freehold, NJ	1	3	9	6	1	20	(7–27)	11.4	110,000	632
Fuenlabrada, Spain ^e	0	2	3	3	0	8	(3–12)	10.6	48,000 ^f	640

A las conclusiones a las que llega es que apenas se obtiene un 1% de mejora en la calidad del aire. Sin embargo, este porcentaje puede incrementar significativamente conforme se incrementa la presencia de vegetación en una ciudad. Pero no todas las investigaciones llevan a lo mismo.

En un estudio realizado por la Universidad de Helsinki (Yli-Pelkonen, Setälä, & Viippola, 2016), se pone en duda el hecho de que las plantas son eficientes en la absorción de gases contaminantes. Al realizar pruebas de niveles de dióxido de carbono (NO₂), ozono (O₃) y compuestos orgánicos volátiles (COV) en el área metropolitana de Helsinki, se concluyó que la vegetación que se encuentra en forma de barreras a lo largo de carreteras no mejoraba la calidad del aire en cuanto a la disminución de gases. Sin embargo, la barreras verdes si lograban disminuir los niveles de partículas gruesas.

Otra de las conclusiones a las que llegan los investigadores de la Universidad de Helsinki, es que debido a la baja capacidad de absorción de gases contaminantes de la vegetación de la zona norte de Helsinki, se obtuvieron bajos resultados en la disminución en los niveles de gases contaminantes. Por ello dependiendo de la especie de la planta y las características de las mismas (fronda, follaje, área de la hoja etc), se tendrá mayor o menor eficiencia en la absorción de contaminantes.

En otro estudio realizado en Carolina del Norte, Estados Unidos, se trabajó con vegetación que se encontraba a lo largo de diferentes carreteras para determinar la capacidad de dicha vegetación para retener partículas ultrafinas (PUF) y absorción de monóxido de carbono (CO). Una de las conclusiones a las que llegan es que la vegetación con follaje denso puede disminuir las PUF y concentraciones de CO hasta en un 56% (Lin et al., 2016).

También, se han realizado investigaciones para determinar cuál es la mejor manera de colocar barreras verdes a lo largo de carreteras con el fin de mitigar los impactos ambientales debido a las emisiones de gases contaminantes. Este tipo de colocación de barreras, está influenciado principalmente por la deposición y dispersión de los gases y partículas contenidas en las emisiones de gases. Por lo que es necesario estudiar a fondo el comportamiento de estas partículas (Tong, Baldauf, Isakov, Deshmukh, & Max Zhang, 2016).



Figura 4.9. Diseño de barreras para mitigar gases contaminantes (Tong et al., 2016)

Mitigación de la isla de calor

Otro de los beneficios de la presencia de áreas verdes en zonas urbanas es la mitigación de la isla de calor, el cual es un fenómeno presente en grandes ciudades del mundo. El disminuir este fenómeno también tiene beneficios en la cuestión del ahorro de energía que es empleada en el uso de ventiladores y aire acondicionados, así como la disminución de la huella de carbono. Antes de poder entrar a fondo al tema del ahorro de energía y la disminución de la huella de carbono, es necesario definir el término isla de calor.

Una isla de calor, como ya se ha mencionado, es un fenómeno muy presente en las áreas urbanas a nivel mundial. Este fenómeno se caracteriza por incrementar la temperatura promedio de una ciudad. Esto se debe a la gran cantidad de energía que es necesaria para que una ciudad pueda funcionar de manera adecuada. A su vez, las grandes cantidades de energía son disipadas en forma de calor, al cual se intensifica debido a la radiación solar (Gago, Roldan, Pacheco-Torres, & Ordóñez, 2013).

Este calor generado por la disipación de energía queda “atrapado” debido a la estructura general de una zona urbana. Una vez llegada la noche, este calor lentamente es disipado. Todo lo anterior provoca un incremento en la temperatura dentro de una ciudad, especialmente en ciudades que carecen de áreas verdes. El fenómeno de la isla de calor ocasiona que, debido al alza en la temperatura media de una ciudad, en invierno no sea necesario el uso de sistemas de calefacción, pero en verano sea necesario el uso de ventiladores y aire acondicionado, lo cual genera un uso de energía eléctrica mayor.

Otra de las características de una isla de calor es que, al estar una ciudad expuesta a temperaturas mayores al promedio en zonas rurales aledañas, se disminuye la capacidad de evapotranspiración. Esto se debe a la poca presencia de áreas húmedas o de áreas que produzcan humedad (Barrandas, 2013). Además, otro de los factores que también intervienen en la presencia de una isla de calor es la poca capacidad de los materiales de construcción de cambiar sus propiedades térmicas, ya que la cantidad de energía que almacenan dichos materiales es la misma.

En la figura 4.10, se puede observar el efecto de una isla de calor dentro de una urbe. En la región perteneciente a la zona centro de una metrópoli, se puede percibir un incremento de 7 °F con respecto a la temperatura media registrada en un área rural. Esto se debe a que, en los núcleos urbanos, se presenta una mayor cantidad de actividad con respecto a otras regiones, generando un mayor consumo de energía. Conforme uno se va alejando de la zona centro de la ciudad, se presenta una disminución en la temperatura (Gago et al., 2013).

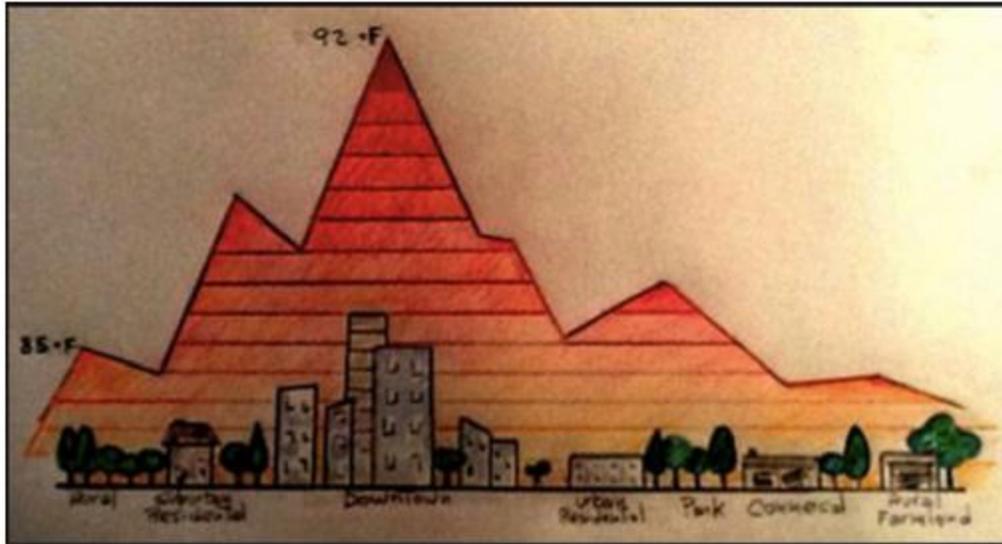


Figura 4.10. Efecto isla de calor (Gago et al., 2013)

Otro de los efectos de la isla de calor dentro de una ciudad, es la modificación del clima local de la ciudad, e incluso la creación de microclimas urbanos. Estos microclimas son creados principalmente debido al incremento en la temperatura promedio y al cambio de distribución de corrientes de aire debido a la presencia de edificios. Pero a su vez, la estructuración de una ciudad influye en la generación de estos microclimas. Básicamente, en lo que respecta a la estructuración de una ciudad, los elementos que influyen en el desarrollo de estos microclimas son la geometría urbana, áreas verdes y las propiedades de las superficies de una ciudad (Wong et al., 2011).

A finales de los años 90, se realizaron diversos estudios para determinar el efecto de una isla de calor dentro de una ciudad. Uno de estos estudios se llevó a cabo en la ciudad de Los Ángeles y en las zonas conurbadas de esta ciudad. Una de las conclusiones a la que llegaron especialistas del Heat Island Group de Berkeley, California fueron que, en una tarde de verano con cielo despejado, la temperatura del aire en una ciudad es más alta por 2.5 °C comparada con la temperatura del aire en zonas rurales aledañas. Además, también se encontró que el consumo de energía eléctrica incrementaba de 2-4% por cada 1 °C de incremento en la temperatura (Akbari, Pomerantz, & Taha, 2001).

En los años 60, Ernesto Jáuregui (1974) realizó un estudio en la Ciudad de México, en el cual llegó a la conclusión de que, en zonas con mayor presencia de vegetación, como en el caso del Bosque de Chapultepec, se presentaban menores temperaturas a comparación de ciudades. Incluso, logró observar que la diferencia de temperatura entre la región más cálida y la menos cálida era de aproximadamente 12 °C. En el siguiente mapa de la época, se puede observar las diferentes temperaturas que se registraron dentro de la Ciudad de México (ver figura 3.11).

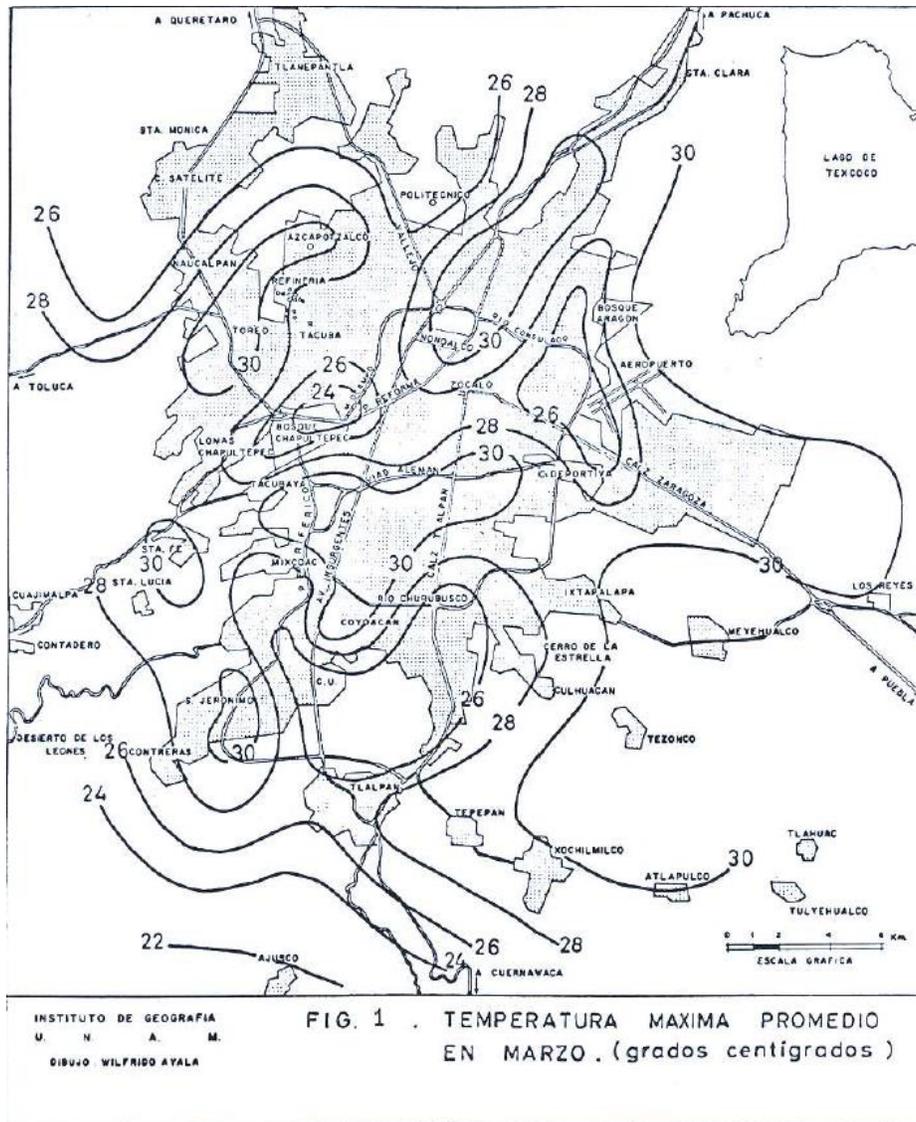


Figura 4.11. Temperaturas máximas en la Ciudad de México, en la época de los 60 (Jáuregui, 1974)

Como se puede observar, las temperaturas máximas durante el mes de marzo se presentaron en las zonas centro, parte de Coyoacán y en las inmediaciones del Aeropuerto de la Ciudad de México. Las zonas que presentaron temperaturas menores fueron en las zonas del Ajusco y en el Bosque de Chapultepec. En el mapa siguiente, también se puede observar las temperaturas mínimas promedio registradas en el mes de febrero de 1969.

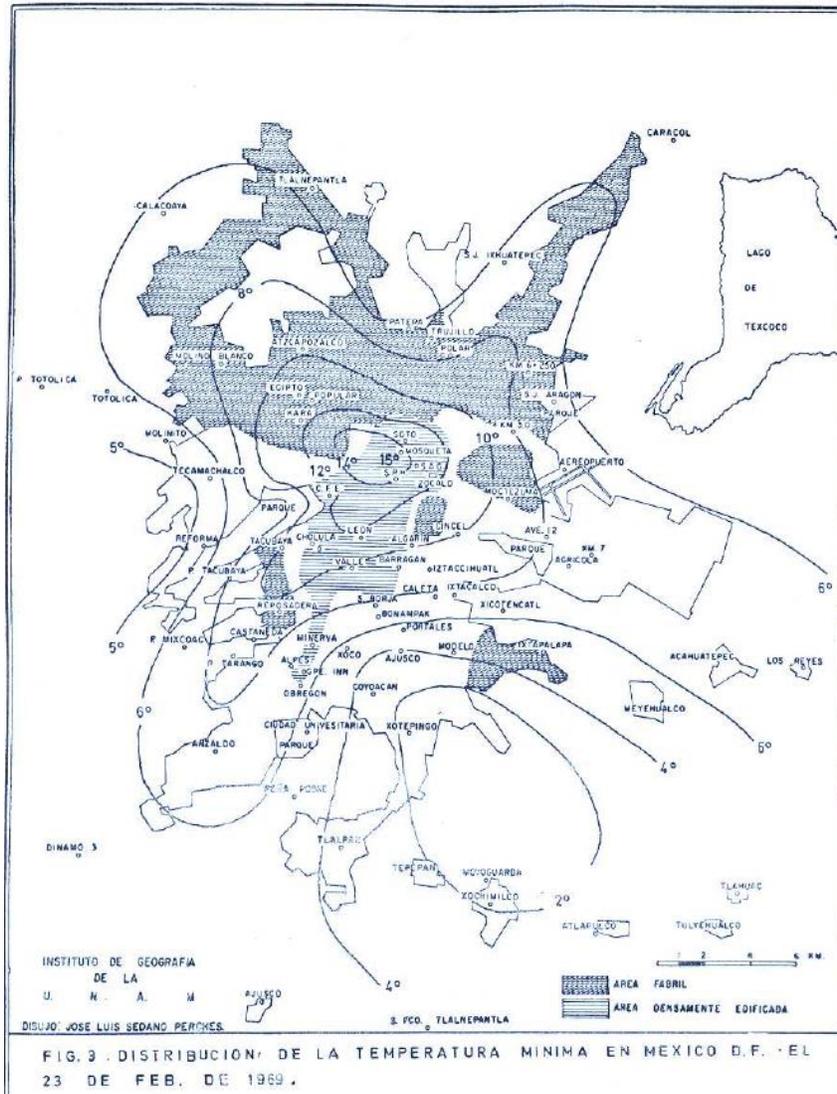


Figura 4.12. Temperatura mínima en la Ciudad de México (Jáuregui, 1974)

En el mapa anterior, se puede percibir la brecha en el registro de las temperaturas entre las zonas de áreas fabriles, las áreas densamente edificadas y en las áreas más alejadas a la zona Centro de la Ciudad de México. Claramente se observa que durante la época en la que se llevó a cabo el estudio, la diferencia de temperaturas entre el centro de la ciudad y las zonas de los alrededores de la ciudad fueron de aproximadamente 11 °C.

Hoy en día, la situación no ha cambiado mucho, en el año de 2017 se registraron temperaturas de hasta 32 °C durante los meses de abril. A pesar de que se presenta un incremento 2 °C con respecto al año de 1969, el problema se concentra con el paso de los años. Simplemente, en los últimos años, se han presentado una mayor cantidad de días con temperaturas mayores a las 30 °C durante los meses de marzo a mayo. Probablemente la temperatura se ha mantenido prácticamente “igual” a lo largo de los años, pero es más frecuente tener días con temperaturas

altas, por lo que la presencia de la “isla de calor” dentro de la Ciudad de México es cada vez más notoria.

Ahorro de energía

Como ya se ha mencionado, uno de los beneficios de contar con áreas verdes en una zona urbana es la mitigación de los efectos generados por la isla de calor. Dentro de la mitigación de estos efectos, se tiene la disminución de la temperatura ambiental, lo que conlleva a un ahorro de energía. Este ahorro en energía está enfocado en la disminución de consumo de energía eléctrica en cuanto al uso de aire acondicionado para el enfriamiento de edificios. Generalmente, el ahorro de energía no solo se mide en cuanto al porcentaje de incremento o decremento del uso de energía eléctrica, sino que también toma en cuenta el ahorro monetario que esto implica.

En un estudio realizado en diferentes ciudades de Estados Unidos (Akbari et al., 2001), se elaboró un modelo para poder analizar el ahorro económico que conllevaba una mayor presencia de áreas verdes dentro de una ciudad. De acuerdo con el modelo que proyectaron, la formación de sombra debido a la vegetación implicaba un ahorro de energía eléctrica de hasta un 30%, lo que significa un ahorro de entre 3.6 a 4.8 kW/d. Además, el ahorro económico podía llegar a ser de hasta doscientos dólares a lo largo de la vida de un árbol.

A nivel metropolitano, el mismo estudio mencionaba que por cada 100 m² de sombra se podía tener un ahorro monetario de entre 5 a 25 dólares anuales, logrando disminuir la temperatura hasta en 3 °C. Al analizar los resultados obtenidos entre un área de 100 m² y una zona metropolitana, las cifras eran verdaderamente significativas. Por lo que, el ahorro económico en una pequeña área podía “parecer insignificante”, pero a mayores escalas, las cifras son mayores. En la tabla 4.7, se presenta una tabla de los resultados que se obtuvieron en dicha investigación.

Tabla 4.7. Ahorro anual de consumo de electricidad considerando tres arboles por edificio y considerando una sombra de 100 [m²] (Akbari et al., 2001)

Location	Old residence		New residence		Old office		New office	
	Direct	Indirect	Indirect	Direct	Indirect	Direct	Indirect	Direct
Atlanta	5	2	3	1	3	2	2	2
Chicago	3	2	1	0.5	1	1	2	1
Los Angeles	12	8	7	5	6	12	4	10
Fort Worth	6	6	5	4	4	5	2	4
Houston	10	6	6	4	3	5	3	3
Miami	9	3	6	3	3	2	2	2
New York City	3	2	2	1	3	3	2	2
Philadelphia	-5	0	-7	0	2	1	1	1
Phoenix	27	8	16	5	9	5	6	4
Washington, DC	3	2	1	1	3	1	2	1

En un estudio más reciente, se encontró que, en la ciudad de Atenas, Grecia la intensidad media de la isla de calor excedía por 10 °C a la temperatura media. Lo anterior generó que el consumo

de energía para poder enfriar edificios urbanos se incrementara al doble. A su vez, este incremento en la temperatura ocasionó que el consumo de energía debido a sistemas de calefacción disminuyera en un 30% durante el invierno (Gago et al., 2013).

Impacto psicológico en seres humanos ante la presencia de áreas verdes

A principios del año 2000, en Francia se llevó a cabo un estudio para poder identificar el efecto de ciertos sonidos, con respecto a las visuales, con el fin de determinar una relación audiovisual entre un paisaje y un ambiente sonoro. La principal fundamentación de este trabajo considera que un ruido urbano rara vez es percibido como un elemento aislado, por ello es la necesidad de evaluar las visuales y el ruido de manera simultánea (Viollon, Lavandier, & Drake, 2001).

Los resultados de la investigación realizada por Viollon (2001), arrojaron que conforme se tiene mayor presencia de urbanización, los ruidos se vuelven más molestos. Caso contrario a las visuales que muestran presencia de áreas verdes, en este caso, los ruidos se tornan más agradables. Además, la presencia de áreas verdes proporcionaba una sensación de tranquilidad a los participantes de dicho estudio.

Pero, este no es el único estudio que muestra que la presencia de áreas verdes brinda una sensación de tranquilidad. En un artículo publicado por investigadores de Hanyang University, en Corea del Sur, se menciona que incluso el material con el cual son construidas las barreras acústicas influye en la percepción del ruido (Hong & Jeon, 2014).

Haciendo uso de realidad virtual, se reproducían imágenes con barreras acústicas construidas por diferentes materiales y, de manera simultánea se reproducía algún tipo de sonido. A los resultados que llegan, es que la opacidad de la barrera ocasionaba que la percepción del ruido o sonido aumentara o disminuyera. Es decir, que un mismo sonido podía ser percibido o más alto o más bajo de acuerdo con la barrera que proyectaban con ayuda de realidad virtual (Maffei, Masullo, Aletta, & Gabriele, 2013).

Retomando la investigación realizada por Hong y Yong (2014), ellos hicieron uso de cinco barreras acústicas, todas de diferentes materiales. Dentro de los materiales empleados, se encuentran la madera, aluminio, concreto, acrílico translucido y vegetación. Esta experimentación se llevó a cabo en un laboratorio especializado, por lo que trataron de simular las condiciones mostradas en la figura 4.13.

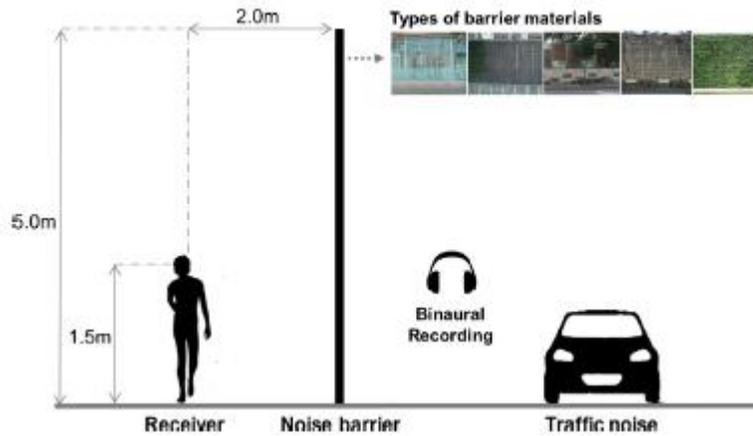


Figura 4.13 Barrera de diferentes tipos de materiales (Hong & Jeon, 2014)

Las conclusiones a las que llegan Hong y Yong (2014), también coinciden con los resultados obtenidos por Viollon (2001) y por Maffei (2013). Los participantes en dicho estudio percibieron menores niveles de ruido con barreras verdes que con una barrera de concreto, a pesar de que fueron expuestos a los mismos niveles de ruido. También realizaron una segunda experimentación colocando vegetación en las barreras construidas de madera, aluminio, concreto y acrílico translucido. En esta segunda experimentación, también concluyeron que se perciben menores niveles de ruido cuando se tiene presencia de vegetación. En la figura 4.14, se muestran las gráficas obtenidas en dicho estudio.

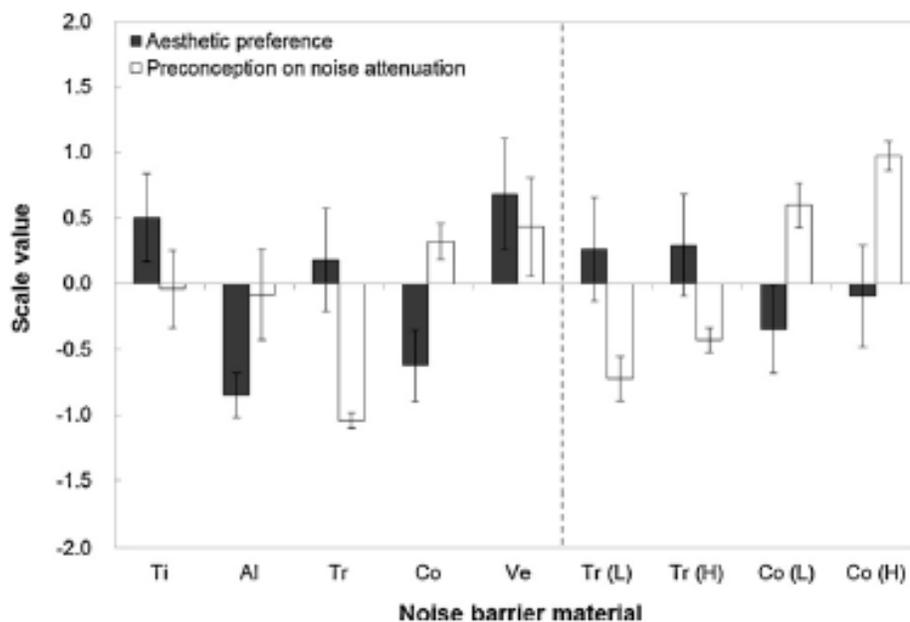


Figura 4.14 Preferencia comparada con preconcepción de atenuación de ruido (Hong & Jeon, 2014)

5. Metodología

Como ya se ha mencionado, de acuerdo con el material en el cual estén construidas las barreras acústicas, se tendrá mayor o menor atenuación de ruido. A pesar de que materiales como el concreto o acrílico cuentan con altos coeficientes de absorción acústica, este tipo de barreras no han sido completamente aceptadas por el ser humano.

Algunas investigaciones han comprobado que, ante la presencia de barreras construidas con materiales como el concreto, las personas perciben menores niveles de ruido a pesar de ser altamente eficientes en la mitigación del ruido. Caso contrario cuando se tiene presencia de áreas verdes, ya que las personas perciben menores niveles de ruido a pesar de que se tengan menores niveles de atenuación. Además, la presencia de áreas verdes también cuenta con beneficios como la disminución del efecto invernadero, la mitigación del fenómeno de la isla de calor y el ahorro de energía.

Tomando como referencia estudios anteriores, uno de los objetivos de este trabajo de investigación es identificar el porcentaje de atenuación en barreras verdes construidas con especies vegetales, espesores y alturas diferentes. Lo anterior, tiene como objetivo identificar las condiciones en las cuales se presenta la mayor atenuación posible del ruido, con la finalidad de proponer el uso de cierto tipo de barreras bajo condiciones específicas.

Para poder llegar a dichas conclusiones, es necesario contar con una metodología que permita obtener resultados confiables, para así poder proporcionar una propuesta para la mitigación del ruido ambiental.

La metodología propuesta para fines de este trabajo de investigación cuenta con diversas etapas, las cuales se muestran a continuación:

1. Identificación de la zona de estudio. La zona de estudio debe contar con áreas verdes o barreras verdes suficientes y diversas, con el fin de determinar el porcentaje de atenuación acústico en diferentes tipos de barreras verdes.
2. Selección de equipo para realización de mediciones.
3. Elección de puntos dentro de la zona de estudio que cuenten con barreras verdes o con zonas de vegetación densa para registrar información acústica. Estos puntos de estudio deben de contar con vegetación, densidad, altura y ancho diferentes.
4. Determinar la hora y tiempo de medición con la finalidad de crear condiciones controladas, es decir, evitar ruido de fondo y presencia de viento.
5. Visita al sitio para realización del estudio. Es necesario verificar que el equipo de medición se encuentre calibrado para poder obtener resultados confiables.
6. Recopilación, clasificación e interpretación de datos obtenidos en campo, con la finalidad de obtener tablas, gráficas, etc.
7. Mostrar los resultados en diversas gráficas de acuerdo con los resultados obtenidos.

5.1 Áreas verdes de Ciudad Universitaria

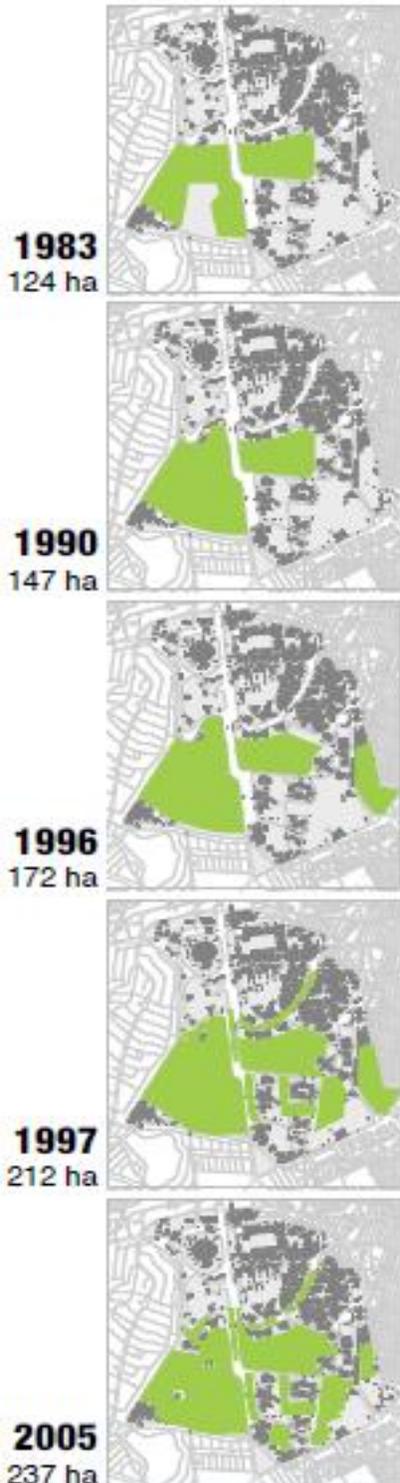


Figura 5.1 Evolución de la REPSA
(Zambrano et al., 2016)

En el año de 1943 se eligió el sur de la Ciudad de México para la construcción de un nuevo campus de la Universidad Nacional Autónoma de México. Como es sabido, hasta antes de los años 50, las diferentes escuelas que conformaban a la UNAM, se encontraban distribuidas en el Centro Histórico de la Ciudad de México.

El hecho de que el terreno en donde se iba a construir Ciudad Universitaria formara parte de un predio poco productivo para fines agrícolas, propició la elección del Pedregal de San Ángel como sede de lo que hoy conocemos como CU (Quiroz Rothe & Sandoval Olascoaga, 2010). La planeación de Ciudad Universitaria no solo consideraba la estética arquitectónica, sino que también buscaba encontrar una armonía entre los elementos arquitectónicos, urbanísticos y paisajísticos. A su vez, la gran riqueza ecológica del Pedregal de San Ángel generó un interés en el manejo adecuado del espacio exterior, de tal manera que se lograra una fusión entre el arte arquitectónico y el diseño del paisaje (Camarena Berruecos, 2010).

Sin embargo, el incremento en la comunidad estudiantil en Ciudad Universitaria y la urbanización de las zonas aledañas del Pedregal de San Ángel, propiciaron diversos cambios en los espacios abiertos de CU. Esto generó una pérdida paulatina del ecosistema natural del Pedregal. Además, la introducción de especies no nativas del ecosistema desplazó poco a poco a las especies originales.

Esta pérdida del ecosistema representativo del Pedregal creó una preocupación en la comunidad científica, por lo que en el año de 1983 se creó la Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) la cual se encuentra en Ciudad Universitaria (Camarena, & Lot, 2016).

En el año de 1983, sólo se contaba con 124 ha de Reserva del Pedregal. Conforme fue transcurriendo el tiempo, el área que conforma la REPSA fue incrementando, y para el año de 2005, ya se contaban con 237 ha (Zambrano et al., 2016).

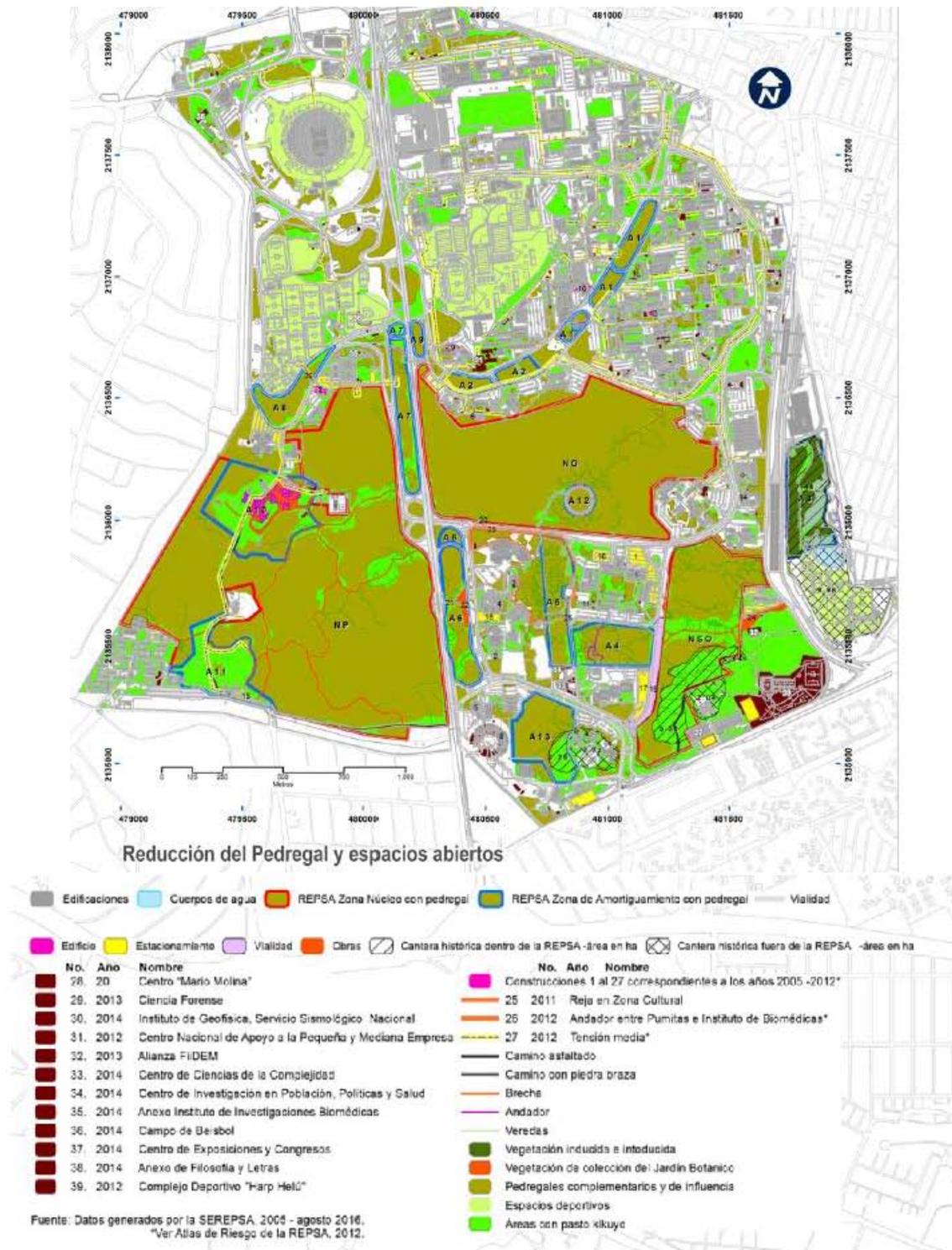


Figura 5.2 Reducción del Pedregal y espacios abiertos (Zambrano et al., 2016)

La creación de la REPSA ha sido un puntapié para el manejo de áreas verdes dentro de Ciudad Universitaria, ya que, de acuerdo con el Atlas de riesgo de ecosistemas, publicado por la UNAM,

en el año de 2016 se contaron un total de 121 ha de áreas verdes en el campus de Ciudad Universitaria.

Pero, a pesar de que las cifras de áreas verdes suenen alentadoras, gran parte de estas áreas están conformadas por especies introducidas, lo cual implica un cambio en el paisaje natural del Pedregal dentro de Ciudad Universitaria. Dentro de estas especies introducidas se encuentran los pastos kikuyo, eucaliptos, jacarandas, trueno, entre otras. En el mapa que se muestra en la figura 5.2, se pueden observar las áreas pertenecientes a la REPSA y las áreas verdes introducidas.

Haciendo uso del mapa de espacios abiertos en Ciudad Universitaria (Figura 5.2), es necesario identificar zonas en donde se presenten áreas que se sean útiles para el estudio propuesto. Para ello, es necesario realizar un recorrido dentro del campus de Ciudad Universitaria para poder ubicar las áreas que se considerarán para la toma de mediciones.

Las características que se tomarán en cuenta son las siguientes:

1. El tipo de vegetación debe de ser diferente en cada una de las zonas de estudio.
2. Los puntos de estudio deben contar con características diferentes entre sí, es decir con alturas y anchos diferentes.
3. Los puntos de estudio deben de encontrarse en zonas poco transitadas o con flujo vehicular poco denso, con el fin de mantener un ambiente controlado.
4. Los puntos de estudio deben de ser accesibles y con espacio suficiente para el manejo de equipo de medición.

Una vez definidas las características necesarias de los puntos de estudio, el siguiente paso es realizar el recorrido dentro de CU.

Al terminar de hacer un reconocimiento de diferentes zonas, se localizaron diversos puntos potenciales para llevar a cabo mediciones acústicas. En la figura 5.3, se muestra la ubicación de los posibles puntos de muestreo.



Figura 5.3. Puntos potenciales de muestreo
Fuente: Google Earth

5.2 Instrumentos de medición

Debido a que uno de los principales objetivos es identificar las características y las condiciones en las cuales se presenta una mayor atenuación acústica en una barrera verde, es necesario conocer los niveles de ruido a frecuencias diferentes. Por ello, se hará uso del equipo propuesto por Chih Fang Fang y Der Lin Ling, investigadores de la Universidad Nacional de Taiwán (C. F. Fang & Ling, 2005):

- Sonómetros de precisión
- Amplificador de sonido
- Generador de frecuencias
- Calibrador piezoeléctrico o pistófono
- Trípode para sonómetros

A su vez, para poder obtener resultados confiables, se hará uso de las especificaciones que marca la NMX-AA-59-1978, la cual establece las características técnicas que debe cumplir un sonómetro de precisión, las cuales son:

1. Un sonómetro de precisión debe contar con un micrófono, amplificador, redes de ponderación, atenuador y un instrumento indicador.
2. Es necesario que el sonómetro abarque frecuencias entre los 10 a los 20,000 Hz.
3. Por lo menos, debe incluir una red de ponderación, A, B y C.
4. El micrófono debe de ser de tipo omnidireccional.
5. La sensibilidad del micrófono debe de oscilar entre los ± 5 dB.
6. En el caso del instrumento indicador, este debe seguir la Ley cuadrática.
7. Es recomendable que la escala del instrumento indicador sea graduada entre los -5 y +10 dB.
8. Para poder calibrar el sonómetro es necesario que se haga en un rango de frecuencias entre los 20 y los 12,500 Hz.

5.3 Plan de trabajo

Para llevar a cabo las mediciones pertinentes, es necesario la elaboración de un plan de trabajo con el fin de optimizar tiempos y llevar un orden en campo. Como ya se ha mencionado, uno de los principales objetivos de esta investigación es obtener el porcentaje de atenuación acústica en barreras verdes e identificar las condiciones en donde se presenta el punto de mayor eficiencia de mitigación de ruido. Por ello, a continuación, se describe la metodología a seguir al momento de tomar mediciones en campo.

Antes de tomar mediciones, es necesario definir los horarios de trabajo en campo. Debido a que las mediciones se tomarán en puntos ubicados dentro de Ciudad Universitaria, estos datos se tomarán durante el periodo vacacional estudiantil. Esto se debe a que, durante el periodo

vacacional, la movilidad dentro de Ciudad Universitaria aumenta. Este incremento en la movilidad se presenta por el bajo flujo de estudiantes durante este periodo, ya que es mucho mayor la comunidad estudiantil con respecto a la comunidad administrativa. Estas mediciones también se podrán llevar a cabo los fines de semana, ya que el flujo de gente es menor.

El hecho de tomar mediciones en periodo de asueto académico permite mantener condiciones controladas en cuestión de ruido, ya que, se busca que el único ruido que pueda alterar los resultados sea precisamente el ruido natural del entorno y no el ruido de fondo.

Otro de los aspectos que también se tiene que considerar es el viento, ya que este puede ser factor al momento de registrar información. Cuando se tienen velocidades altas de viento, este puede desviar la trayectoria del sonido, además de que los niveles de sonido puedan incrementar. Por ello, es recomendable hacer mediciones ante poca presencia de viento.

Una vez considerados los horarios y los factores climáticos, la siguiente etapa consiste en la elaboración de un mapa en donde se ubiquen los puntos que se van a estudiar. Previamente se mostró un mapa con los puntos potenciales de estudio, pero, no es el mapa definitivo. El mapa o croquis por usar en campo debe contener únicamente los puntos a estudiar.

Para iniciar con el registro de mediciones, es necesario contar con dos sonómetros, un amplificador de sonido, un generador de frecuencias y tripiés para cada uno de los sonómetros. Antes de realizar cualquier tipo de medición, es necesario calibrar los sonómetros, con la finalidad de obtener resultados confiables y precisos. Una vez calibrados los sonómetros, cada uno de los sonómetros serán colocados en diferentes posiciones.

Antes de iniciar las mediciones, es necesario realizar un esquema de colocación de la fuente de sonido y de los sonómetros. La colocación del equipo se hará considerando la “línea central” de la barrera. Esta “línea central” se dibujará de manera perpendicular desde el centro de la barrera.

Para iniciar con la toma de mediciones, es necesario colocar el amplificador de sonido y el generador de frecuencias frente a la barrera a analizar, de preferencia, a 2 m de distancia de la barrera. En caso de que el punto no permita tomar los 2 m de separación, se tomará la distancia a pie de banqueta. Este caso se puede presentar cuando se tenga presencia de una vialidad frecuentemente concurrida y no se pueda colocar el equipo en dicha vialidad.

En el caso de los sonómetros, uno será colocado de frente a la fuente de sonido con una separación de 2 m, es decir, pegado a la barrera. El segundo sonómetro será colocado detrás de la barrera, las mediciones se harán a cada 5 y 10 m de distancia de la barrera. Cabe mencionar que la altura de la fuente de sonido y de los sonómetros debe ser la misma. Esto debido a que se está considerando que el sonido incide de manera perpendicular a la barrera y, por ende, perpendicular a los sonómetros, tal y como se muestra en la figura 5.4.

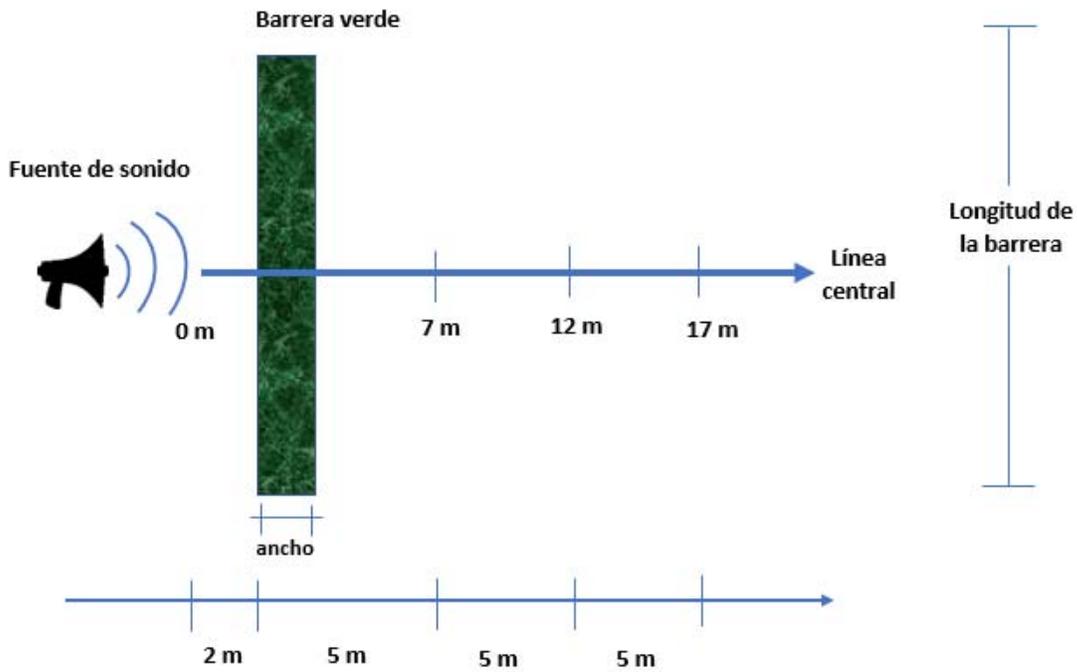


Figura 5.4 Diagrama de acomodo del equipo de medición en campo

Ambas mediciones, considerando altura y distancia, se elaborarán de manera simultánea, con la finalidad de optimizar el tiempo. Solo será necesario verificar que el sonómetro colocado en la altura media de barrera se encuentre a la misma distancia que la fuente de sonido. En la figura 5.5, se muestra un diagrama de colocación del equipo.

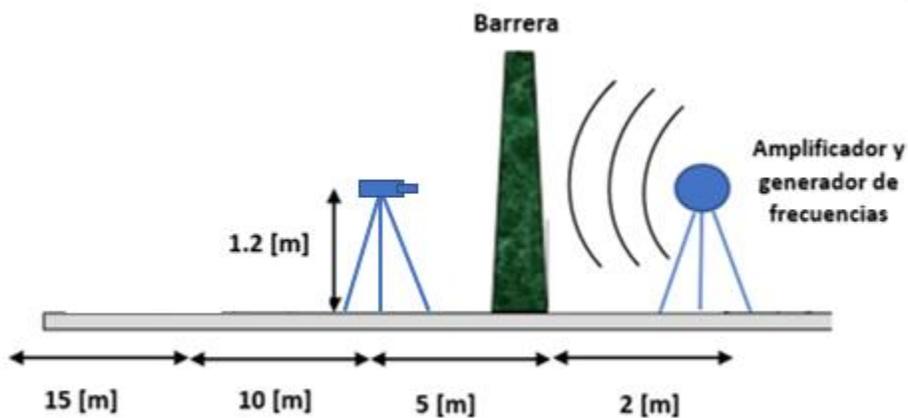


Figura 5.5. Propuesta de acomodo del equipo de medición para diferentes alturas

Una vez colocado el equipo, es necesario ajustar el amplificador y el generador de frecuencias. De acuerdo con las investigaciones realizadas por Fang y Ling (2003), es recomendable que se mantengan los niveles de ruido constantes, proponiendo niveles de 48 ± 2 dB, los cuales corresponden al ruido de fondo o ruido ambiente. En el caso de esta investigación, será necesario medir los niveles de ruido de ruido provenientes del amplificador para asegurarse que la emisión sea constante y no llegue a alterar las mediciones.

Sin embargo, no sólo se va a medir la atenuación de ruido basándose en niveles de emisión constantes, también se busca encontrar en qué frecuencia se presenta la mayor atenuación de ruido. Por ello, se va a mantener una emisión de ruido constante, pero considerando frecuencias diferentes. En el libro publicado por Nilsson, Bengsston y Klæboe (2014), los estudios de absorción acústica abarcan frecuencias de 0-1600 Hz en un tubo de impedancia, pero como en este caso las mediciones se harán en campo, el rango de frecuencias y los niveles de emisión de ruido pueden variar. Estas variaciones se harán como medida de seguridad para las personas que estén realizando mediciones. Por cada punto de análisis se tomarán 5 datos.

Otro tipo de mediciones que se llevará a cabo será emitiendo sonido al aire libre, es decir, sin barrera. Para este tipo de mediciones se seguirá el procedimiento establecido para las mediciones con barreras.

Para llevar un control y un orden al momento de tomar mediciones, es necesaria la elaboración de una tabla de registro, la cual se presentan en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 Tabla para obtención de datos en campo

# PUNTO O BARRERA	
Coordenadas	X
	Y
L [m]	
A [m]	
H [m]	

Fecha	
Hora de llegada	
Temperatura	
Ubicación de sonómetro	
Ruido de fondo	

Frec/rep	Emisión de amplificador	5 [m]					10 [m]					15 [m]				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
100																
200																
300																
400																
500																
600																
700																
800																
900																
100																
1100																
1200																
1300																
1400																
1500																
1600																

5.4 Trabajo de campo

Horario de medición

Como ya se ha mencionado, el factor de mayor importancia para determinar los horarios para la realización de mediciones es el flujo de gente y de vehículos dentro de Ciudad Universitaria. Por ello se estableció que los días y los horarios óptimos para medir eran los fines de semana en un horario entre las 8:00 am a las 4:00 pm. Lo anterior se decidió tomando las siguientes consideraciones:

1. A pesar de que los fines de semana, especialmente los sábados, se dan clases en Ciudad Universitaria, la cantidad de gente dentro del campus es mínima en comparación con el resto de la semana.
2. Debido a que será necesario la transportación del equipo de medición, y que los puntos a medir no se encuentran cercanos entre ellos, el uso del transporte interno de Ciudad Universitaria (PumaBús) facilita el acceso a los puntos de medición y el transporte del equipo. Como se va a hacer uso del PumaBús, los horarios de servicio los fines de semana son los siguientes:

Rutas	Horarios	
	Sábado	Domingo
1,2,4,5 y 9	6:00 – 15:00 hrs.	Sin servicio
3 y 10	6:00-23:00 hrs.	6:00-23:00 hrs.

3. Los fines de semana, a pesar de contar con gente externa a Ciudad Universitaria, existen avenidas que se encuentran cerradas, lo cual resulta beneficioso debido a que el ruido generado por vehículos no será factor.
4. Los días sábados en el horario establecido, aún se puede ingresar en algunas instalaciones de Ciudad Universitaria. Esto es importante ya que algunos de los puntos a muestrear se encuentran en el interior de dichas instalaciones.
5. El hecho de trabajar con diferentes frecuencias a niveles altos puede ocasionar molestia a las personas que se encuentren expuestas. Por ello, es indispensable contar con poca gente en los alrededores de los puntos de medición.

Puntos de medición

Para poder determinar los puntos definitivos, fue necesario identificar aquellas barreras de fácil acceso, además del consentimiento previo del personal que se encuentra laborando dentro de las instalaciones. Los puntos definitivos fueron los siguientes:

1. Barrera de junípero (Instituto de Investigaciones filológicas)
2. Barrera de bugambilia (Herpetario, Facultad de Ciencias)
3. Barrera de sábila (Posgrado de Ingeniería)

Dichas barreras se encuentran localizadas en los siguientes puntos de Ciudad Universitaria.



*Figura 5.6. Localización de puntos de muestreo.
Fuente: Google Earth*

Otro aspecto de gran importancia para la elección de barreras vegetales fue la topografía del lugar. El hecho de contar con topografía irregular puede llegar a ocasionar dificultades a la hora de colocar la fuente de sonido y los tripiés. En la tabla 5.2, se muestra una tabla con las características físicas de cada una de las barreras.

Tabla 5.2 Características físicas de las barreras verdes a estudiar

Barrera	Punto	Localización	Especie vegetal	Altura [m]	Ancho [m]	Largo [m]
	P-01	X: 2135608.272 [m] Y: 480854.658 [m]	Junípero	1.20 [m]	1.02 [m]	5.80 [m]
	P-02	X: 2136729.224 [m] Y: 479885.177 [m]	Bugambilia	2 [m]	0.4 [m]	12.5 [m]
	P-03	X: 2137086.096 [m] Y: 480878.796 [m]	Sábila	2 [m]	2.30 [m]	7.90 [m]

Instrumentación

Para poder realizar las mediciones pertinentes, se hizo uso del siguiente equipo:

- 2 sonómetros universales UEI DSM 100
- 1 flexómetro
- 2 tripiés
- 1 generador de frecuencias
- 1 baffle de 8" modelo MSA-7908BTE
- Altavoz modelo 404600

En el caso de los sonómetros universales, estos cuentan con las especificaciones mostradas en la tabla 5.3.

Tabla 5.3 Características de sonómetros UEI DSM 100 (Hernández Corona, 2014)

Pantalla	LCD de 3.1/2 dígitos
Rango de medición	A LO (ponderación baja) 35-100 dB
	A HI (ponderación alta) 65-130 dB
	C LO (ponderación baja) 35-100 dB
	C HI (ponderación alta) 65-130 dB
Estándares aplicables	De acuerdo con IEC651 tipo 2
Resolución	0.1 dB
Rango de frecuencia típico del instrumento	30 Hz-12 KHz
Precisión	±2 dB en niveles acústicos de 94 dB
Rango dinámico	65 dB
Frecuencia de ponderación	A y C
Micrófono	Tipo condensador Electret ½"
Calibración	Sistema de oscilación interna (1 KHz onda senoidal general de 94 Hz)
Temperatura de operación y humedad	De 0 a 50 °C, debajo de 80% RH
Fuente de poder	Batería de 9 V (006p 0 6F22)
Vida de batería	Aproximadamente 100 hrs. (alcalina)
Dimensiones	240 (L) x 68 (W) x 25(H) mm
Peso	215 gr

Para el baffle de 8" modelo MSA-7908BTE, las especificaciones son las mostradas en la tabla 5.4:

Tabla 5.4. Especificaciones bafle 8" modelo MSA-7908BTE.
Fuente: Página oficial Mitzu ®

Alimentación	13.5 Vcc 1000 mA
Potencia RCM	20 W
Potencia P.M.P.O.	3200 W
Consumo de energía en condiciones normales de operación	0.02 kWh
Consumo de energía en modo espera	0.002 kWh
Bluetooth versión	2.1
Rango de frecuencia	2.4 GHz
Rango de alcance Bluetooth	Hasta 30 m probado en una línea sin obstrucciones, bajo condiciones óptimas
Calibración	Sistema de oscilación interna (1 KHz onda senoidal general de 94 Hz)
Alimentación entrada	100-240 Vca 60 Hz 20 W máx.
Alimentación salida	13.5 Vcc 1000 Ma

Para el altavoz modelo 404600, se tienen las especificaciones de la tabla 5.5:

Tabla 5.5 Características de altavoz modelo 404600.
Fuente: Página oficial de Bose®

Alimentación	110-220 V
Potencia nominal	100-240 V
Bluetooth versión	2.0
Rango de alcance Bluetooth	Hasta 9 m
Dimensiones	240 (L) x 48 (W) x 130 (H) mm
Alimentación salida	13.5 Vcc 1000 Ma



*Figura 5.7 Equipo para realización de mediciones.
Fuente: Página oficial Bose®, Mitsu®, tomada 2018*

Antes de hacer uso del equipo, es necesario realizar algunos ajustes. En el caso del sonómetro, será necesario calibrarlo entre cada medición. Para poder calibrar el equipo, es necesario seguir los siguientes pasos:

1. La pastilla de rango se coloca en “LO”, la de respuesta se coloca en “F” y la de función se coloca en “Cal 94 dB”.
2. Para calibrar el sonómetro es necesario obtener una lectura de 94 dB, por ello es necesario ajustar el sonómetro a dicha lectura.

En el caso del altavoz, no es necesario realizar calibración alguna, lo único necesario por hacer es subir el volumen al máximo para obtener niveles de presión acústica altos de tal manera que el ruido de fondo interfiera lo menos posible en los resultados.

Para el uso del baffle, es necesario que verificar que se encuentre totalmente cargada la batería, ya que, al reproducir frecuencias bajas, es necesaria una mayor cantidad de energía para que el woofer logre entrar en vibración continua. Además, también es necesario ajustar las frecuencias bajas y altas, así como el volumen. En cuanto a volumen, es necesario procurar mantenerlo a un mismo nivel durante toda la medición.

Muestreo en sitio

Para poder identificar las condiciones bajo las cuales se presenta una mayor atenuación de ruido en barreras verdes, fue necesario tomar 5 mediciones por cada frecuencia. Cada medición se realizó en intervalos de 5 segundos. Cuando se tenía presencia de viento o de ruido generado por el paso de algún vehículo, el sonómetro tendía a registrar niveles mayores en comparación con los niveles registrados en condiciones “estables” (sin viento ni ruido generado por fuentes externas). Por ello, el tiempo de medición podía incrementar conforme se presentara alguno de los factores anteriores.

Antes de instalar el equipo y los sonómetros, fue necesario realizar mediciones en cada una de

las barreras con la finalidad de registrar la altura, ancho y largo de cada una de ellas. Además, también fue necesario obtener una muestra de vegetación para que posteriormente se lograra identificar la especie de planta empleada en la barrera verde.

También se registró la temperatura ambiente, la posición geográfica de cada una de las barreras, la hora de llegada y la fecha. Para poder obtener la posición geográfica de los puntos de estudio, se hizo uso de una aplicación de GPS para dispositivos móviles.

Una vez registradas las medidas de la barrera y la información adicional, se colocó el sonómetro conforme al diagrama mostrado en la figura 5.4.



*Figura 5.8. Acomodo de sonómetros en Punto 2 a una distancia de 5 m
Fuente: elaboración propia*

Una vez colocados los sonómetros y la fuente de sonido, se inició con la reproducción de diferentes frecuencias. Las frecuencias consideradas en este estudio fueron de 100 Hz hasta llegar los 800 Hz como máximo. Debido a que la exposición constante de frecuencias puras puede resultar molesto, frecuencias más altas ya no fueron tomadas en cuenta. Otro factor también fue la duración de la pila inalámbrica, ya que debido a que las frecuencias bajas requerían de mayor energía para poder reproducirse, la pila de las fuentes de sonido generalmente duraba máximo 3 horas. Lo anterior ocasionaba que no se permitieran hacer mayor número de mediciones.



*Figura 5.9. Fuente de sonido incidiendo sobre Punto 1 de estudio
Fuente: elaboración propia*



*Figura 5.10. Calibración de sonómetros
Fuente: elaboración propia*

Una vez terminadas las mediciones haciendo uso de una barrera vegetal, la siguiente medición se realizó siguiendo el mismo principio que las mediciones anteriores, pero ahora no se tenía la presencia de una barrera verde. Por lo que las ondas sonoras producidas por las fuentes de sonido se iban a propagar al “aire libre”.



*Figura 5.11. Fuente de sonido sin barrera vegetal en Punto 2
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 5.12 Fuente de sonido sin barrera vegetal en Punto 3
Fuente: Elaboración propia*

6. Análisis de resultados

Para poder identificar las características con las cuales se presenta una mayor mitigación de ruido en una barrera verde, fue necesario realizar una comparación entre los datos obtenidos con y sin presencia de barrera. Para ello, fue necesario obtener un promedio de los niveles de presión acústica registrados de cada una de las frecuencias. Debido a que el nivel de sonido se mide en decibeles y estos están representados de manera exponencial, no se puede realizar un promedio aritmético. Para poder obtener un promedio de los datos de cada una de las frecuencias, se hace uso de la ecuación 27:

$$L_{promedio} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (27)$$

En donde:

$L_{promedio}$ = Promedio de n número de mediciones

L_i = nivel de presión acústica del dato i

Una vez obtenido el promedio de los datos obtenidos, es necesario calcular el porcentaje de atenuación y la atenuación relativa. En el caso del porcentaje de atenuación, este se obtendrá al dividir la diferencia de la media del nivel de presión acústica con barrera y sin barrera entre los niveles de presión acústica registrados sin barrera. Para la atenuación relativa, se calculará una media de todos los porcentajes de atenuación haciendo uso de la ecuación anterior.

Una vez obtenidos los promedios de los niveles de presión acústica, los porcentajes de atenuación y la atenuación relativa fue necesaria la elaboración de gráficas que permitieran la interpretación de resultados. Las principales gráficas por obtener es la de porcentaje de atenuación con respecto a la frecuencia y la de atenuación relativa con respecto a la distancia.

6.1 Atenuación con respecto a la frecuencia

Uno de los principales objetivos de la obtención de una gráfica de atenuación con respecto a la frecuencia es la identificación del punto en donde se encuentra la máxima atenuación. Además, al compararse con diferentes elementos de estudio, se puede localizar el material que resulta más eficiente en cuanto a atenuación de ruido y bajo que frecuencias se presenta ese máximo.

Como ya se mencionó, se realizaron muestreos en tres tipos de barreras diferentes. La primera barrera consistía en un arbusto de junípero, la segunda en una barrera de bugambilia y la tercera una barrera de sábila. Cada uno de estos elementos de estudio mostraron comportamientos diferentes, lo cual puede ser observado en la figura 6.1.

% Atenuación/Frecuencia
5 [m]

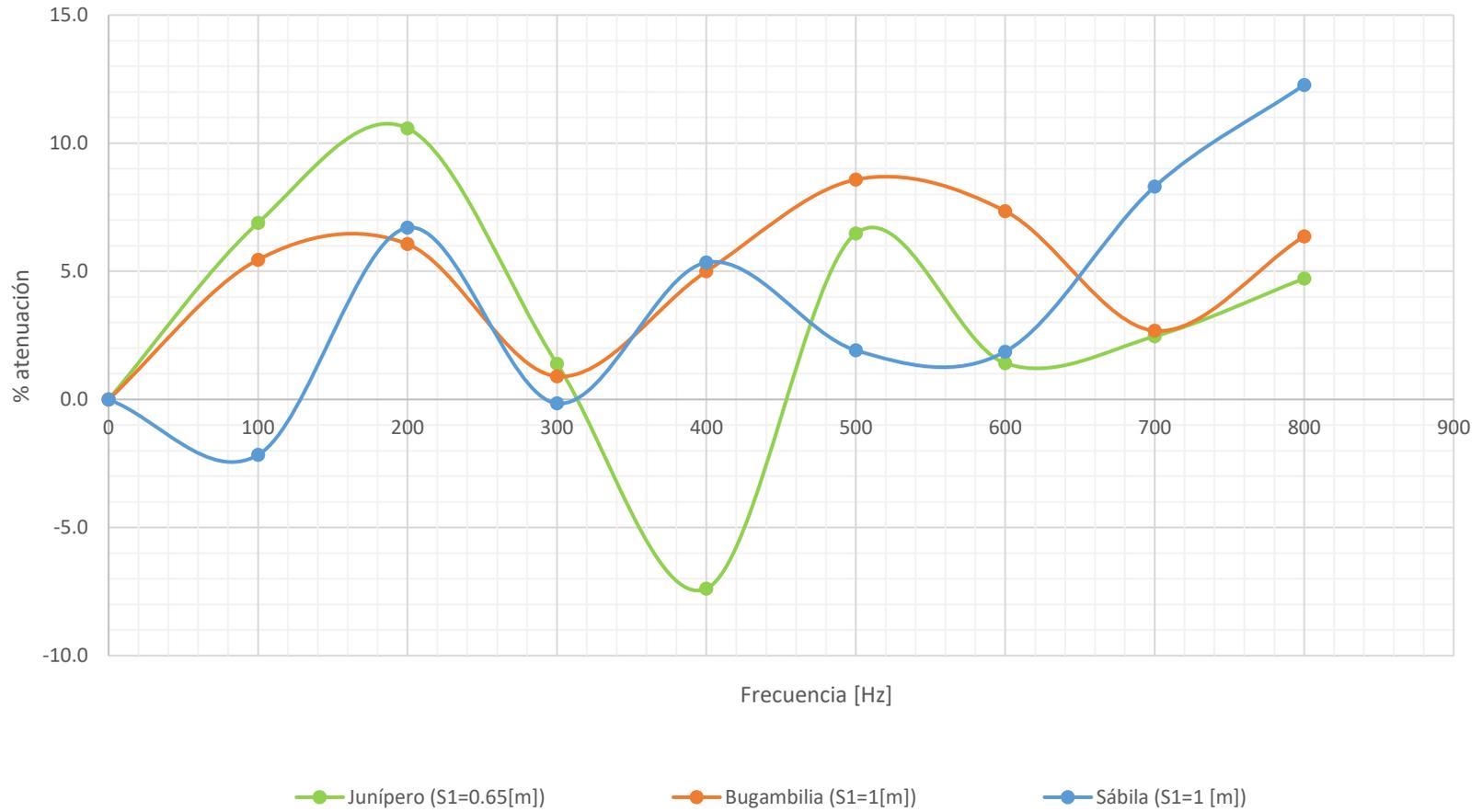


Figura 6.1 Porcentaje de atenuación/Frecuencia a 5 m
Fuente: elaboración propia

De acuerdo con la figura 6.1, la barrera que presenta una mayor atenuación acústica es la barrera formada por sábila con un máximo de 12.3% de atenuación. Dicha atenuación se alcanza con una frecuencia de 800 Hz.

Así mismo, se puede observar que, a partir de frecuencias de 700 Hz, el porcentaje de atenuación comienza a incrementar. Sin embargo, a pesar de que la barrera de sábila presenta el máximo porcentaje de atenuación, también se observa en la figura 6.1 que, a frecuencias menores de 100 Hz, no se tiene atenuación alguna, por lo que este tipo de barreras no es óptima a bajas frecuencias.

La siguiente barrera que presenta un mayor porcentaje de atenuación es la de junípero, ya que presenta poco más de 10% de atenuación a 200 Hz. Al contrario de la barrera de sábila, el arbusto de junípero presenta mayor atenuación al estar expuesto a frecuencias bajas, ya que el mayor porcentaje de atenuación se presenta a 100 y 200 Hz.

Sin embargo, a pesar de que el junípero presenta las máximas atenuaciones en frecuencias de 100 y 200 Hz, ante una exposición de 400 Hz, la barrera no es eficiente al momento de disminuir el ruido. Por lo que, para este tipo de arbusto, se debe evitar exposiciones de 400 Hz.

El arbusto de junípero también presenta atenuaciones del 6% en frecuencias de 500 Hz, por lo que este tipo de barrera también puede resultar eficiente ante la exposición de este tipo de frecuencias.

Por último, la barrera de bugambilia es la que presenta menores porcentajes de atenuación comparados con las otras dos barreras, ya que el máximo porcentaje de atenuación que se presenta es de poco más del 8% a una frecuencia de 500 Hz. En este caso, se puede observar que las máximas atenuaciones se presentan a frecuencias medias.

Esta barrera de bugambilia, presenta atenuaciones bastantes homogéneas, ya que los puntos de quiebre no son tan drásticos comparados con las otras dos barreras.

Sin embargo, el comportamiento de estas barreras también va a cambiar conforme la distancia incrementa. Muestra de ello es la siguiente gráfica en la cual se observan el comportamiento de dichas barreras, pero ahora a una distancia de 10 m.

Con base en la figura 6.2, se puede observar que la máxima atenuación ahora se presenta con la barrera de bugambilia. Cuando se presenta una distancia de 10 m, la barrera de bugambilia presenta porcentajes de atenuación de hasta 9.1% a 800 Hz.

A una distancia de 10 m, la barrera de bugambilia presenta poca eficiencia a bajas frecuencias ya que cuando la barrera está expuesta a frecuencias de 100 hasta los 300 Hz, se presentan atenuaciones nulas. Es precisamente hasta los 300 Hz cuando la barrera empieza a registrar atenuaciones de ruido. A partir de 300 Hz, la bugambilia presenta un comportamiento bastante homogéneo, ya que los puntos de quiebre no son drásticos.

La siguiente barrera que presenta mayor atenuación es la barrera de sábila debido a que el sonómetro registró atenuaciones de poco más del 6% a una frecuencia de 600 Hz. La sábila también presenta mayor atenuación a una frecuencia de 200 Hz con un valor del 1.9%.

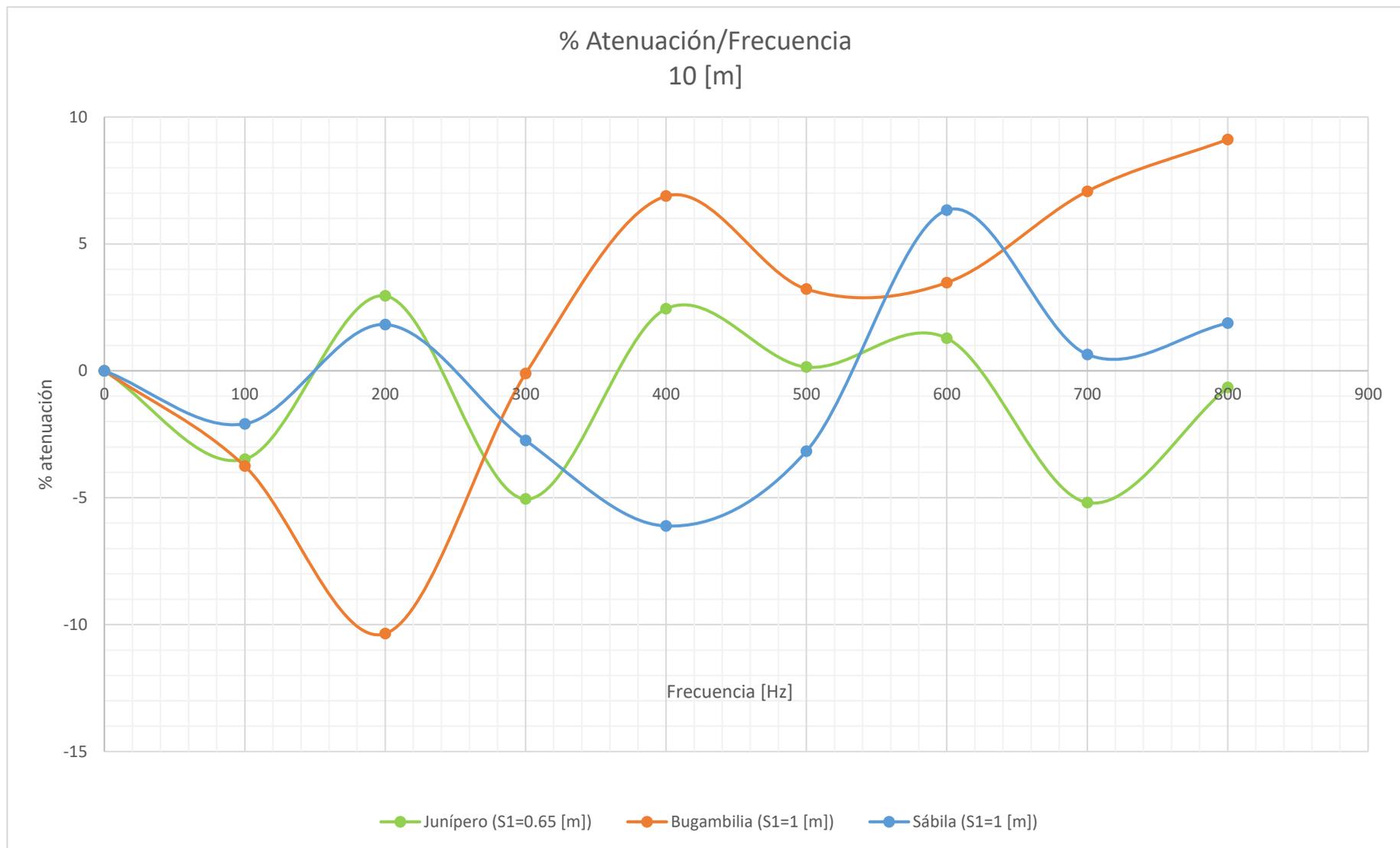


Figura 6.2. Gráfica %Atenuación/Frecuencia a 10 m de distancia

Sin embargo, la barrera de sábila no presenta atenuaciones a frecuencias de 100, 300, 400 y 500 Hz. Por lo que a una distancia de 10 m de la barrera la efectividad de ésta reduce significativamente. Además de que se sigue cumpliendo que, a altas frecuencias, la barrera de sábila es efectiva.

Por último, la barrera que menor porcentaje de atenuación presenta es la barrera de junípero ya que a una frecuencia de 200 Hz se presenta un porcentaje de atenuación de poco más del 4%. Los siguientes puntos que presentan atenuación son los de 400, 500 y 600 Hz, leyendo porcentajes de entre 1 y 2.3%

A frecuencias de 100, 300, 700 y 800 Hz se presentan atenuaciones nulas. En este caso, se sigue cumpliendo que, a altas frecuencias, el junípero no es eficiente. Un punto que resulta alarmante es que ante una exposición de 100 Hz, la barrera presenta una atenuación nula, cuando a 5 m se registraron los valores de atenuación máximos.

En la gráfica también se puede observar que, a una distancia de 10 m, se presentan atenuaciones nulas o “negativas”. Esto se debe principalmente a que, conforme el receptor se va alejando de la fuente, éste percibe menos ruido debido a que las ondas sonoras generadas por la fuente perdieron energía y, por ende, el nivel de presión acústica disminuye.

En el caso del sonómetro, éste va a registrar los niveles de presión acústica del entorno, por lo que, si las ondas sonoras provenientes de la fuente de sonido ya perdieron energía y de manera simultánea se presenta un ruido con mayor intensidad que el de la fuente, entonces el nivel de presión que va a registrar el sonómetro es el del sonido de mayor intensidad.

Como ya se ha mencionado, otro de los factores que juega un papel importante en los resultados es el viento, ya que, ante la presencia de viento, el sonómetro percibe mayores niveles de sonido. Lo anterior se debe a que los sonómetros son equipos sensibles lo que ocasiona que, ante la presencia de algún movimiento externo o vibración, el equipo registra valores mayores.

Lo anterior ocasiona que conforme el sonómetro se aleja de la fuente de sonido, las mediciones registradas por el sonómetro tengan una mayor dispersión, y como consecuencia se tendrá un mayor error en los resultados. Muestra de ello es la gráfica de atenuación relativa con respecto a la distancia.

6.2 Atenuación relativa con respecto a la distancia

Para poder obtener la gráfica de atenuación relativa con respecto a la distancia, fue necesario obtener un promedio de los porcentajes de atenuación registrados en cada uno de los sonómetros de cada uno de los puntos de muestreo. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1 Porcentaje de atenuación con respecto a la distancia

Localización sonómetro		% atenuación	Distancia
Punto 1	Sonómetro a h=0.65 m	5.5	5.00
		0.0	10.00
Punto 2	Sonómetro a h=1 m	5.9	5.00
		4.8	10.00
Punto 3	Sonómetro a h=1 m	6.6	5.00
		3.2	10.00

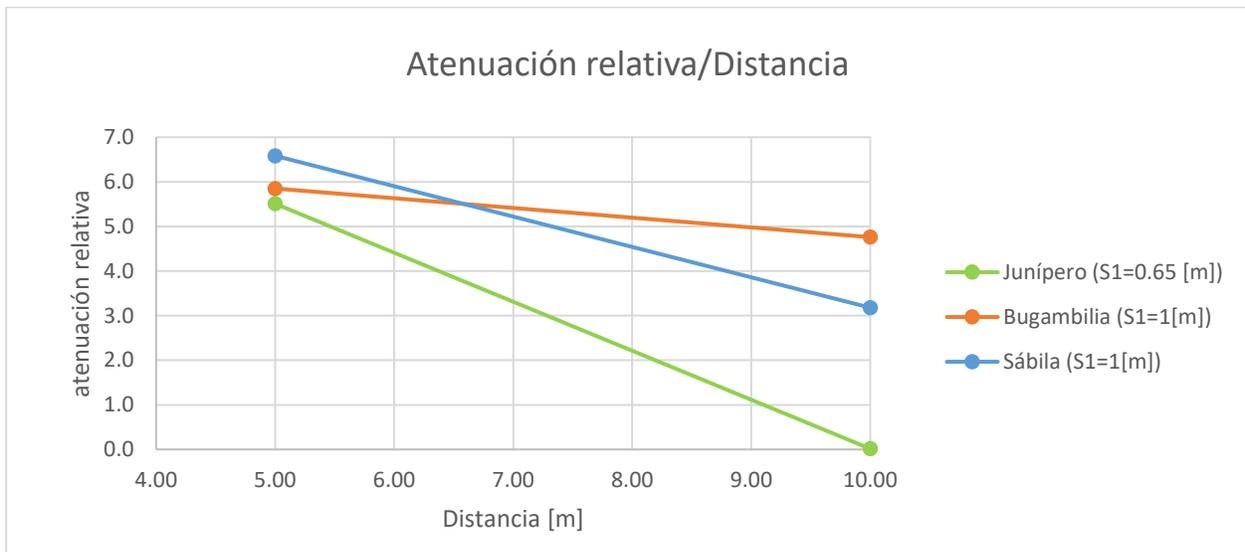


Figura 6.3. Gráfica %atenuación con respecto a la distancia

De acuerdo con la gráfica 6.3, se puede observar que a 5m de distancia, la barrera de sábila es la que presenta un mayor porcentaje de atenuación relativa, registrando valores del 6.6% a una altura de 1 m. Conforme se tiene mayor distancia, el porcentaje de atenuación va disminuyendo hasta llegar a una atenuación del 3.2%.

En el caso de las barreras de bugambilia y de junípero, se registran valores similares, ya que los porcentajes de atenuación acústica registrados por los sonómetros en cada una de las barreras oscilan entre los 5.4 y 5.9% de atenuación relativa.

La principal diferencia entre la barrera de bugambilia y la de junípero, es que a una distancia de 10 m el porcentaje de atenuación relativa no presenta el mismo comportamiento que a 5 m, en el cual se registraron valores de atenuación similares. Para la barrera de bugambilia, el

sonómetro ubicado a 10 m de distancia presenta un porcentaje mayor de atenuación con un 4.8%, mientras que el junípero presenta atenuaciones nulas.

Considerando solamente el porcentaje de atenuación relativa, la barrera más efectiva entre las tres barreras diferentes es la barrera de cactácea ya que registra un porcentaje de atenuación relativa del 6.6%. Al contrario de la barrera de sábila, la barrera de junípero es la que presenta menor porcentaje de atenuación, ya que registra valores del 5.5%

El obtener una gráfica de porcentaje de atenuación con respecto a la distancia nos permite entender un concepto que ya ha sido desarrollado en este trabajo: zona de sombra acústica. Este tipo de gráfica tiene la ventaja de dar una idea del área que abarca dicha zona de sombra cuando se tiene la presencia de una barrera acústica. En el siguiente subtema se hace un desarrollo más amplio de la zona de sombra acústica de las barreras verdes que fueron muestreadas.

6.3 Zona de sombra acústica de los puntos de muestreo

Como ya se ha mencionado, las barreras acústicas hacen uso del fenómeno de difracción, lo cual implica que las ondas sonoras que incidan con la barrera van a presentar diferentes niveles de atenuación a diferentes frecuencias.

Esta difracción de ondas va a formar una zona de sombra acústica, dicha zona de sombra es la región en la cual se percibe un decremento en los niveles de presión acústica o una mayor atenuación del ruido. Fuera de esta zona de sombra, la atenuación del ruido se va a percibir en menor medida.

Una manera para poder identificar esta zona de sombra es a través de una gráfica de atenuación relativa con respecto a la distancia, la cual se obtuvo en el subtema de anterior. Para poder visualizar esta zona de sombra, fue necesario realizar esquemas representativos de la posible zona de sombra que se registró en campo.

La primera zona de sombra obtenida fue la generada por la barrera de junípero, la cual se puede observar en la figura 6.4. A pesar de que esta barrera presenta porcentajes de atenuación de poco más del 5% a una distancia de 5 m de la barrera, se puede observar que, debido a la altura del junípero, ésta realmente no proporciona “protección” al receptor ya que la zona de sombra inicia en el punto más alto de la barrera hasta donde el porcentaje de atenuación es nulo.

En el caso del junípero, el sonómetro a una altura de 0.65 m presentó atenuaciones prácticamente nulas a una distancia de 10 m. En este caso, la zona de sombra del junípero termina a una distancia de 10 m de la barrera.

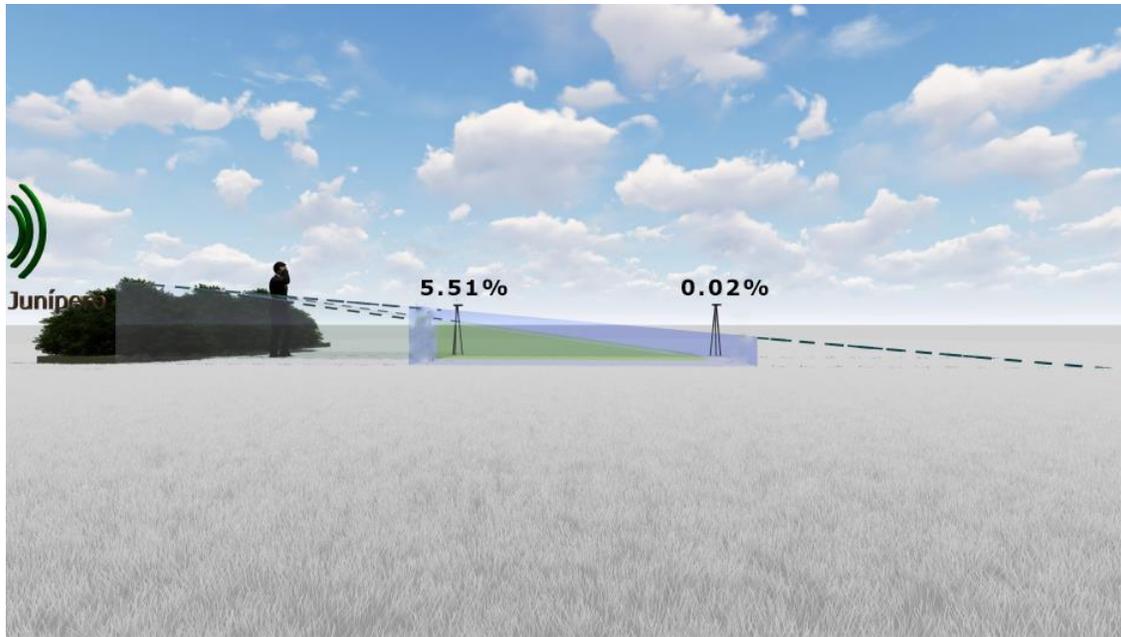


Figura 6.4. Zona de sombra registrada por los sonómetros en la barrera de junípero.

Debido a que la barrera de junípero tiene una altura de 1.30 m, esta no puede proporcionar protección a personas cuya altura sea mayor. Sin embargo, ésta barrera presentó atenuaciones máximas a frecuencias de entre los 100 y los 200 Hz, por lo que su uso puede ser beneficioso para mitigar ruidos a estas frecuencias. Pero, será necesario el uso de barreras de otras características para lograr resultados mejores.

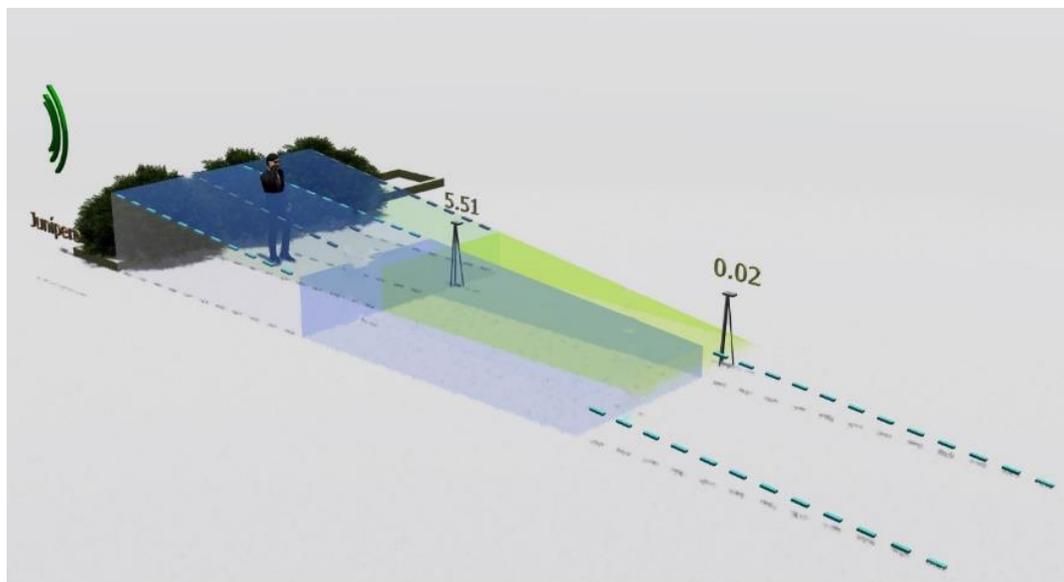


Figura 6.5. Vista aérea de la zona de sombra del junípero

La segunda zona de sombra esquematizada en la figura 6.6, fue la de bugambilia. Esta barrera presentó atenuaciones de 5.85% en el sonómetro con altura de 1 m. En este caso, la distancia que abarca la zona de sombra es mucho mayor, ya que a una distancia de la barrera de 10 m se presentan atenuaciones del 4.76% a una altura de 1 m.

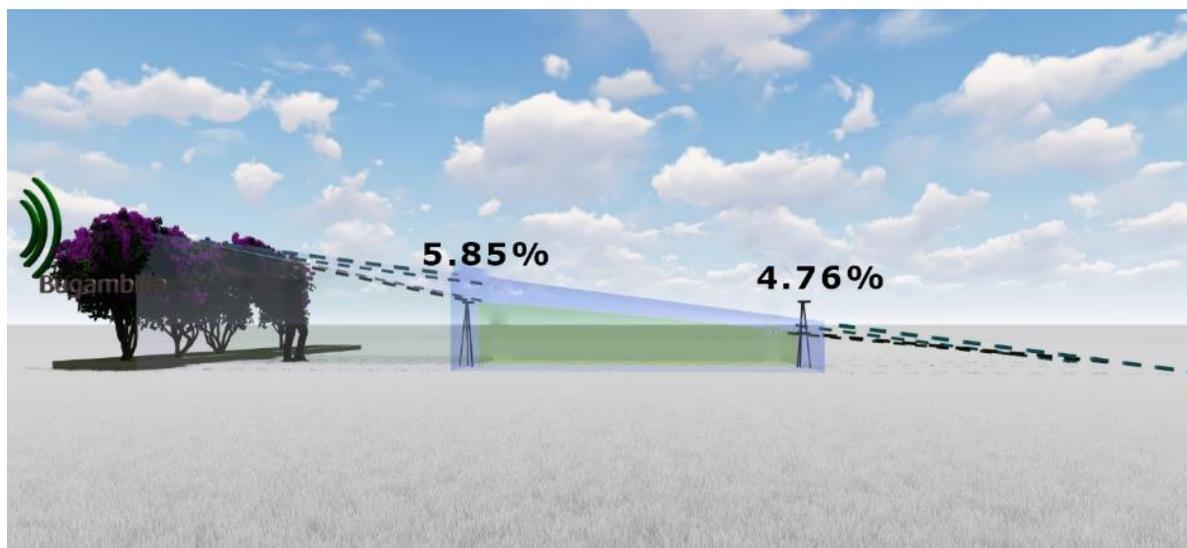


Figura 6.6. Zona de sombra registrada por los sonómetros en la barrera de bugambilia

Para una barrera de bugambilia, la zona de sombra proporciona cierta protección al receptor, ya que la altura de la barrera lo permite. Además, la misma altura de la barrera, es la que proporciona una mayor distancia a la zona de sombra, abarcando así una mayor área.

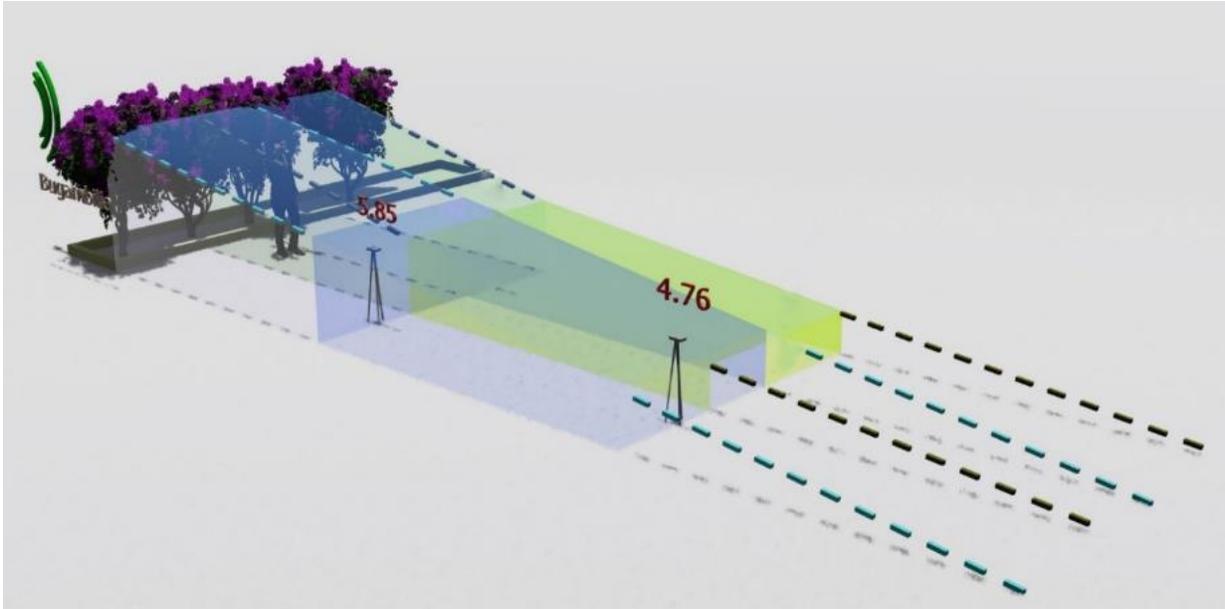


Figura 6.7. Vista aérea de la zona de sombra de la bugambilia

La última zona de sombra es la de la barrera de sábila, al hacer una comparación entre la barrera de bugambilia y de sábila, a pesar de que ambas cuentan con la misma altura, el comportamiento es diferente.

En el caso de la barrera de bugambilia, la altura de la misma es la que permite que se obtenga una mayor distancia de zona de sombra, pero a distancia menores, la atenuación es menor comparada con la sábila.

En la figura 6.8 se observa un mayor porcentaje de atenuación a una distancia menor, pero registra valores menores a mayor distancia. Si bien la diferencia entre los valores de atenuación de la bugambilia y la sábila no varían tanto entre sí, si se logra observar la diferencia de comportamiento.

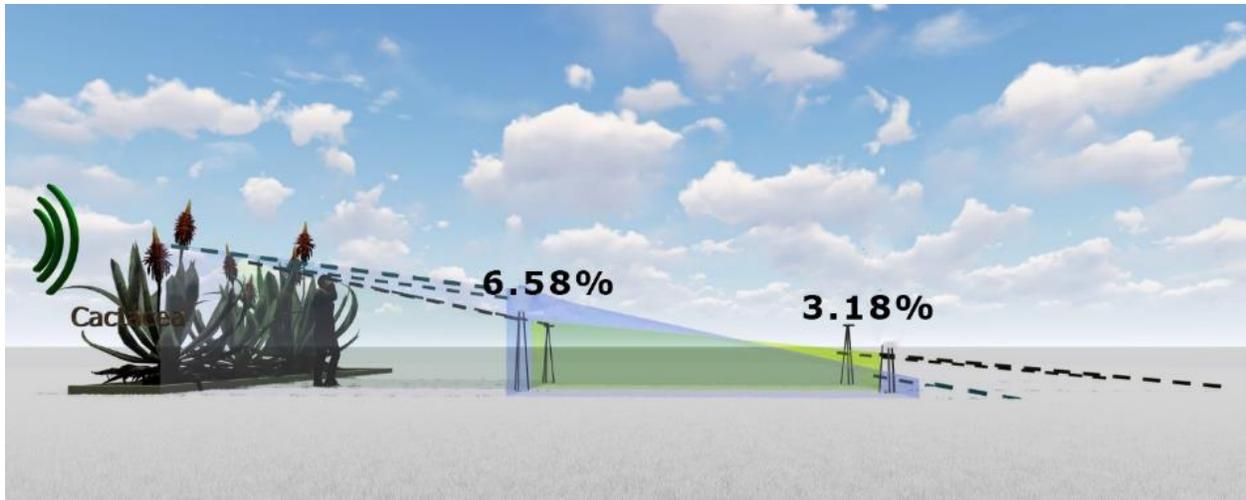


Figura 6.8. Zona de sombra registrada por los sonómetros en la barrera de cactácea

En caso de que se requiera una barrera que logre atenuar frecuencias altas, entonces una barrera de sábila es la indicada. Ya que, de acuerdo con los resultados obtenidos en campo, a partir de 500 Hz, la sábila empieza a ser más efectiva en cuanto a mitigación del ruido. También se encontró que, a frecuencias de 200 Hz, la cactácea también es bastante efectiva.

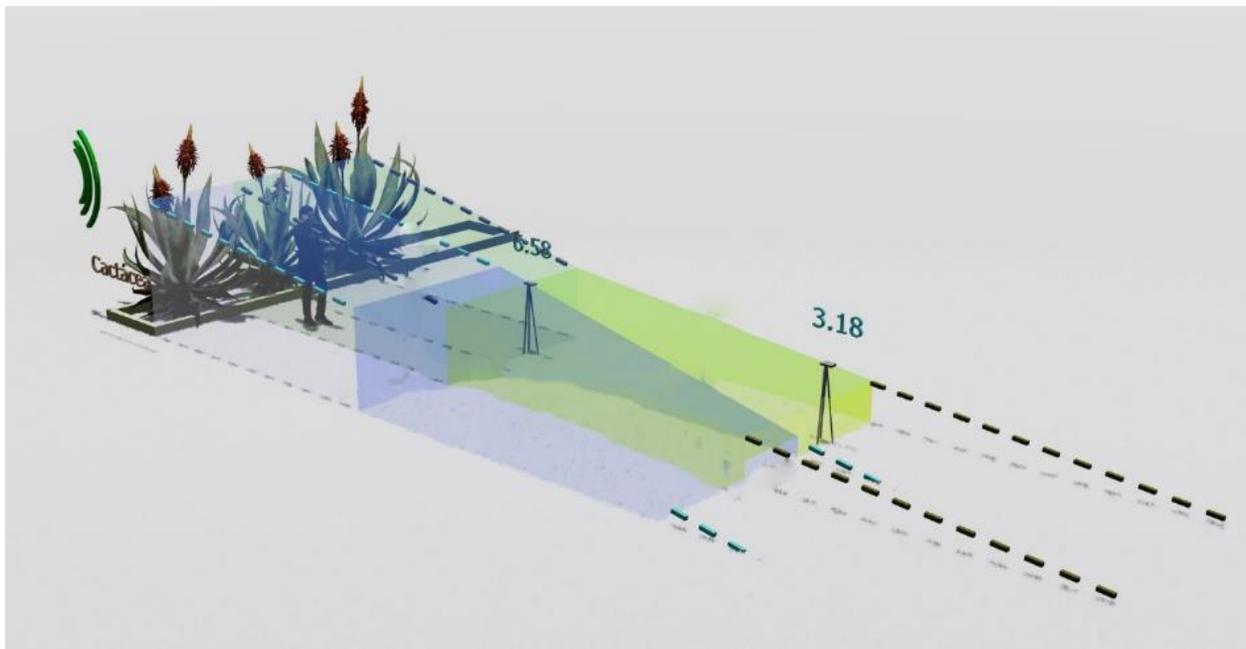


Figura 6.9. Vista aérea de la zona de sombra de la cactácea.

6.4 Comparación de niveles de atenuación entre vegetación y otros materiales

A pesar de contar con atenuaciones de poco más del 9%, es necesario realizar una comparación entre los resultados obtenidos en campo con valores de diferentes materiales. En este caso, el análisis se realizará considerando la diferencia aritmética entre los niveles de presión acústica con barrera y sin barrera. Esta diferencia tendrá como nomenclatura IL (insertion loss), también puede entenderse como índice de pérdida de inserción.

Para poder realizar esta comparación, se tomó como referencia algunos estudios realizados con barreras de concreto. El primer estudio fue elaborado por Herni Halim (2015), en el cual se obtiene la pérdida de inserción de ruido en una barrera elaborada de paneles de concreto y otra de bloques de concreto.

El segundo estudio también se realizó con barreras de concreto, la diferencia es que este estudio considera la forma en la que está elaborada la barrera acústica. Este estudio se elaboró por Chan Hoon Haan y Seon Do Kim (2016) y fue presentado en el 22 Congreso Internacional de Acústica.

Punto 1 Barrera de junípero

Anteriormente, se encontró que el junípero presentó porcentajes de atenuación relativa de 5.5% a una altura de 0.65 m y a una distancia de 5 m. Sin embargo, no se presentó la pérdida de inserción de ruido, por lo que en la tabla 6.2, se presentan dichos valores.

Tabla 6.2. IL registrados en el junípero a 5 [m] de distancia

Barrera de junípero			
Frec/rep	5 m		IL dB
	CON BARRERA	SIN BARRERA	
	Promedio	Promedio	
100	71.9	77.3	5.3
200	68.3	76.4	8.1
300	72.3	73.3	1.0
400	74.1	69.0	-5.1
500	70.1	75.0	4.9
600	73.2	74.3	1.0
700	74.1	76.0	1.9
800	79.8	83.7	4.0
			3.9

En este caso, se tomará en cuenta el promedio de todas las pérdidas de inserción de ruido para obtener el valor IL general. En este caso, se puede observar que el promedio de estas pérdidas es de 3.9 dB. Este valor será necesario al momento de realizar la comparación con las barreras de concreto.

Punto 2 Barrera de bugambilia

En el caso de la barrera de bugambilia, la pérdida de inserción de ruido es de 4.8 dB, el cual corresponde a un porcentaje de atenuación relativa del 5.9%.

Tabla 6.3. IL registrados en la bugambilia a 5 m de distancia

Barrera de bugambilia			
Frec/rep	5 m		IL dB
	CON BARRERA	SIN BARRERA	
	Promedio	Promedio	
100	74.4	78.6	4.3
200	76.5	81.4	4.9
300	80.7	81.4	0.7
400	77.5	81.6	4.1
500	77.5	84.8	7.3
600	76.5	82.6	6.1
700	80.6	82.8	2.2
800	77.4	82.7	5.3
			4.8

Punto 3 Barrera de sábila

La barrera de sábila fue la que presentó mayor eficiencia en cuanto a atenuación de ruido, ya que se registraron valores de hasta 7.1 dB de pérdida de inserción de sonido.

Tabla 6.4. IL registrados en la sábila a 5 [m] de distancia

Barrera de bugambilia			
Frec/rep	5 m		IL dB
	CON BARRERA	SIN BARRERA	
	Promedio	Promedio	
100	62.4	61.1	-1.3
200	69.0	74.0	5.0
300	66.4	66.3	-0.1
Barrera de bugambilia			
Frec/rep	5 m		IL dB
	CON BARRERA	SIN BARRERA	
	Promedio	Promedio	
400	64.5	68.1	3.6
500	65.4	66.7	1.3
600	64.8	66.0	1.2
700	69.4	75.6	6.3
800	69.1	78.8	9.7
900	67.2	79.3	12.0
1000	71.7	79.4	7.8
			7.1

Comparación de barreras verdes con barreras de concreto

Como se mencionó, para poder medir la eficiencia de la vegetación, es necesario comparar los resultados obtenidos en campo con resultados obtenidos de diferentes materiales. De acuerdo con Herni Halim (2015), para que una barrera acústica puede considerarse como efectiva, el valor mínimo de pérdida de inserción de ruido debe ser de 5 dB.

Para poder obtener el valor de pérdida de inserción de ruido, tomaron datos durante el periodo de tiempo en donde se registró mayor afluencia vehicular. A los resultados a los que llegaron fueron los siguientes.

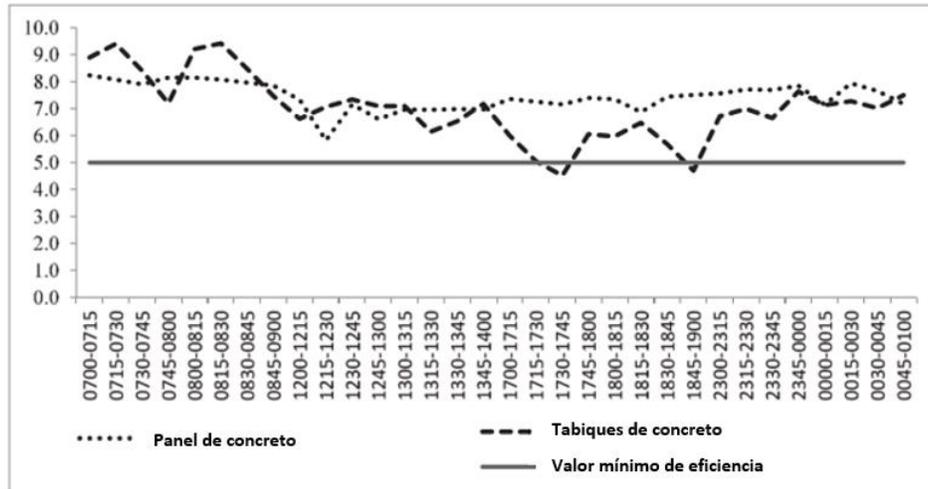


Figura 6.10. IL de barreras construidas de tabique y paneles de concreto (Halim et al., 2015)

Como se puede observar, la barrera elaborada por tabiques de concreto registró mayores niveles de pérdida de inserción de ruido registrando valores de poco más de 9 dB. En el caso de la barrera elaborada por paneles de concreto, esta obtuvo poco más de 8 dB de pérdida de inserción de ruido.

También se puede observar que, en el caso de la barrera de tabique de concreto, el valor mínimo de pérdida de inserción de sonido es de poco más de 4 dB, mientras que la de paneles de concreto registra valores mínimos de 6 dB.

En el estudio elaborado por Haan y Kim (2016), se realizaron mediciones con barreras que tuvieran formas y dimensiones diferentes para encontrar la más óptima. Estas barreras también estaban elaboradas de concreto. En la figura 6.11, se muestran los resultados de dicho estudio.

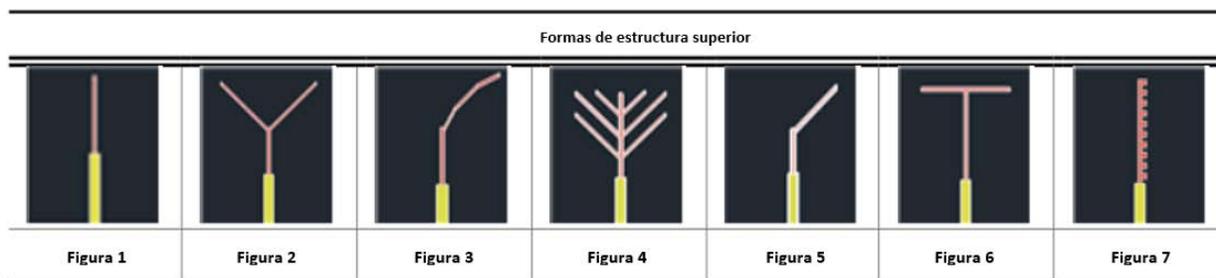


Figura 6.11. Barreras de concreto con diferente estructura superior (Haan & Kim, 2016)

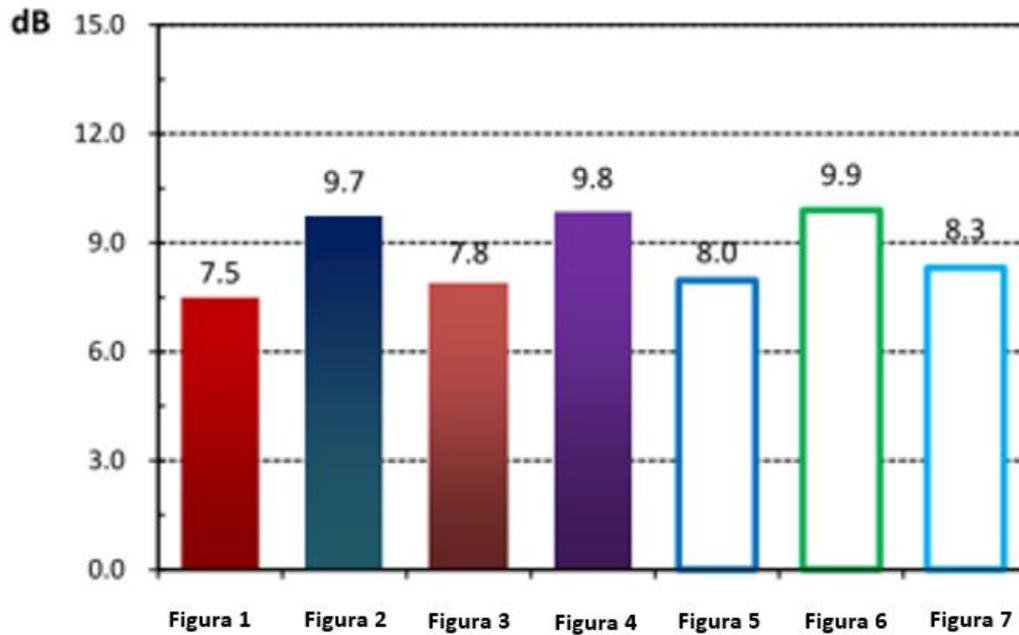


Figura 6.12. IL de barreras de concreto con diferente estructura superior (Haan & Kim, 2016)

Como se puede observar, la barrera número 6 presenta mayor pérdida de inserción de sonido con un valor de 9.9 dB. La barrera número 1, la cual es una barrera tradicional, presenta pérdidas de 7.5 dB siendo la barrera menos efectiva.

Otra de la experimentación que realizaron Haan y Kim, fue poner a prueba barreras tradicionales de concreto, pero cambiando las alturas. Dichos resultados se muestran en la figura 6.13 y 6.14.

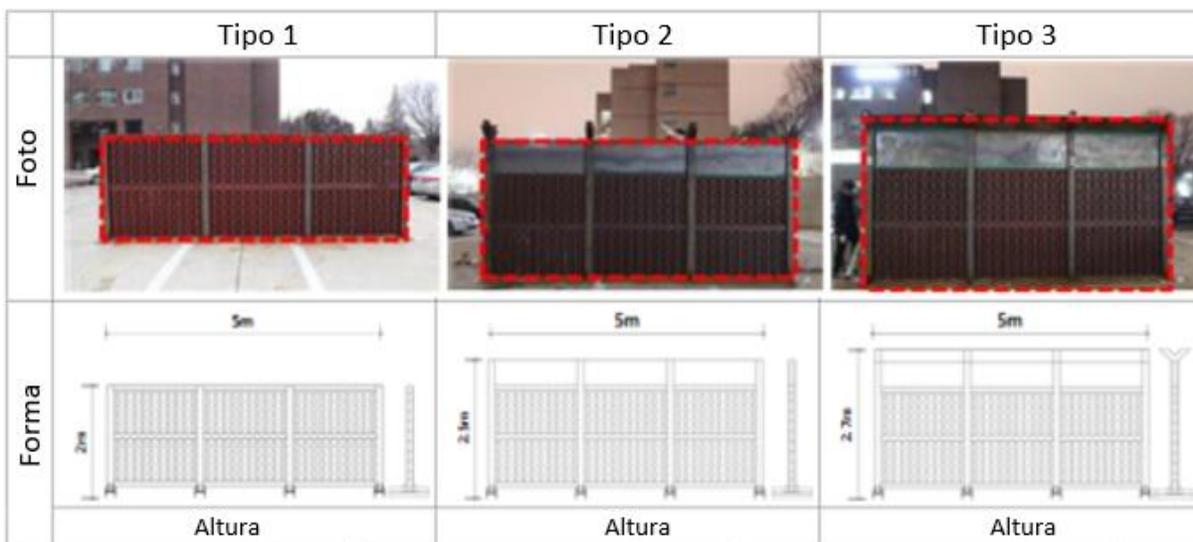


Figura 6.13 Barreras de concreto con diferentes dimensiones (Haan & Kim, 2016)

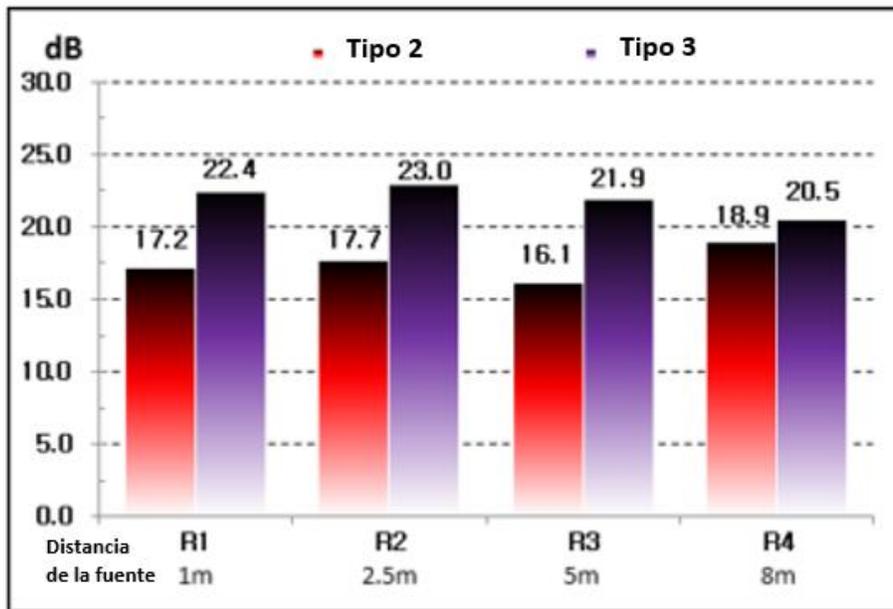


Figura 6.14 IL de barreras de concreto con diferentes alturas (Haan & Kim, 2016)

Con los resultados mostrados en la figura 6.14, se observa que la barrera con mayor pérdida de inserción de ruido es la barrera con altura de 2.7 m a una distancia de 2.5 m de distancia. En el caso de la barrera tipo 2, se observa una pérdida de inserción de ruido de hasta 18.9 dB a una distancia de la barrera de 8 m.

Con los resultados obtenidos por los estudios de Halim (2015) y los de Kim y Haan (2016), se puede realizar una comparación con los valores obtenidos en las barreras verdes que se estudiaron.

Tabla 6.5 Valores máximos de IL en barreras verdes y barreras de concreto

Tipos de barreras							
Junípero	Bugambilia	Sábila	Paneles de concreto (Halim et al., 2015)	Tabiques de concreto (Halim et al., 2015)	Concreto con diferentes tipos de estructuras superiores (Haan & Kim, 2016)	Concreto con diferentes alturas (Haan & Kim, 2016)	Valor mínimo de eficiencia
3.9	4.8	7.1	8.2	9.4	9.9	21.9	5

Como se puede observar en la tabla 6.5, la barrera de junípero no resulta efectiva para la atenuación de ruido, ya que no logra alcanzar el valor mínimo de eficiencia, el cual es de 5 dB.

Para la barrera de bugambilia, aunque el valor de pérdida de inserción es menor que el valor mínimo de eficiencia se puede tomar como buena, ya que a la bugambilia le faltan 0.2 dB para alcanzar el valor mínimo de eficiencia.

En el caso de la barrera de sábila, esta es la única que logra superar el valor mínimo de eficiencia con un valor de pérdida de inserción de ruido de 7.1 dB.

Como se puede observar, ninguna barrera vegetal logra superar el valor de registrado del concreto. Pero el hecho de que las barreras logren pérdidas de inserción de mínimo 5 dB, ya se pueden considerar como una buena alternativa para el control de ruido ambiental.

6.5 Barreras verdes óptimas para frecuencias bajas

Como ya se ha mencionado, las frecuencias que se tomaron en cuenta para este trabajo de investigación están en el intervalo de los 100 y los 800 Hz, esto debido a que los vehículos se encuentran en el rango de las frecuencias bajas a medias.

El hecho de que la propuesta de este trabajo de investigación sea hacer uso de barreras verdes a lo largo de vialidades para atenuar el ruido ambiental, ocasiona que sea necesario identificar una barrera que logre atenuar las frecuencias bajas. Ya que, es precisamente el ruido generado por el tránsito vehicular el que contribuye en mayor medida al ruido ambiental.

Con las gráficas de porcentaje de atenuación con respecto a la frecuencia se puede encontrar la barrera más óptima para atenuar el ruido generado por algunos vehículos. En este caso, se hará uso de los espectrogramas de algunos modelos de automóviles.

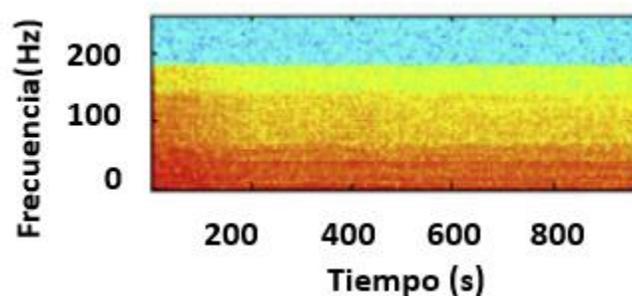


Figura 6.15. Espectrograma de un vehículo (Khunarsal, Lursinsap, & Raicharoen, 2013)

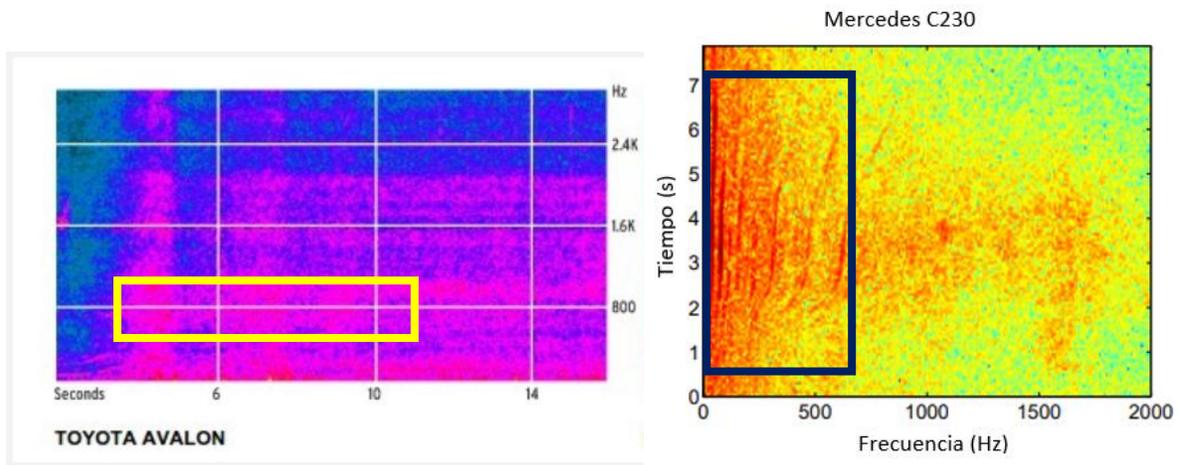


Figura 6.16. Espectrograma de diferentes modelos de vehículos

Fuente: <https://omicronno.elespanol.com>, https://www.mitre.org/sites/default/files/pdf/05_0507.pdf

Con base en las figuras 6.15 y 6.16, se puede observar que las frecuencias generadas por diferentes modelos de vehículos se encuentran en el rango de 0 a 800 Hz. Por ello, es necesario encontrar la barrera más óptima para atenuar frecuencias bajas a medias. Entendiendo por frecuencias bajas a aquellas que están entre los 16 y los 256 Hz y por frecuencias medias aquellas que están entre los 256 y 2000 Hz.

Haciendo uso de las gráficas de porcentaje de atenuación con respecto a la frecuencia que fueron obtenidas, se puede establecer que la barrera junípero es la más efectiva para atenuar frecuencias bajas, ya que a 5 m de distancia registra porcentajes de atenuación de 10.69%.

La barrera de bugambilia es la segunda más efectiva para la atenuación de frecuencia bajas, registrando valores de hasta 9% de atenuación a una frecuencia de 500 Hz. En el caso de la sábila, esta es la menos eficiente ya que a frecuencias de 100 Hz reporta atenuaciones negativas, es hasta los 200 Hz que logra atenuaciones del 7%.

A pesar de que, en análisis anteriores, el junípero fue la barrera menos eficiente en términos generales, resulta que esta especie puede llegar a atenuar bajas frecuencias, lo cual es ideal para la mitigación de ruido generado por tránsito vehicular.

7. Conclusiones

El ruido ambiental es una problemática de gran importancia dentro de las grandes ciudades, ya que las emisiones constantes de ruido pueden llegar a afectar la salud del ser humano. Estas afectaciones no sólo contemplan daños directos al oído, sino que también, pueden resultar en problemas de sueño, estrés, concentración, entre otros.

Por ello, es necesario empezar a proponer soluciones para poder atenuar los niveles de presión acústica presentes en una ciudad. Logrando disminuir los niveles de presión acústica, se puede lograr un ambiente sonoro más agradable para las personas, y como resultado, se puede crear un entorno más propicio para el desarrollo del ser humano.

Mediante el uso de diversos métodos, tales como el control de ruido mediante normativas, mapas de ruido, paisaje sonoro, control de ruido en la fuente, al receptor y control en las vías de transmisión, se puede combatir esta problemática.

Uno de los métodos más empleados para la mitigación de ruido ambiental es el uso de barreras acústicas. Estas barreras acústicas están construidas de diferentes tipos de materiales, predominando las barreras de concreto. La principal función de estas barreras es difractar el sonido, de tal manera que esta barrera genere una zona de sombra acústica. Esta zona de sombra acústica es el lugar detrás de la barrera en donde se perciben mayores atenuaciones de ruido.

A pesar de que las barreras de concreto logran hasta 20 [dB] de atenuación de niveles acústicos, estas barreras no han sido totalmente aceptadas por el ser humano. Ya que estudios revelan que, ante la presencia de barreras de concreto, las personas perciben mayores niveles de presión acústica. Por ello, se han propuesto el uso de barreras acústica elaboradas con vegetación.

En este trabajo de investigación se encontró la barrera vegetal que permite obtener mayor atenuación de ruido ambiental a diferentes frecuencias. Para poder encontrar dicha barrera fue necesario estresar tres tipos de barreras verdes diferentes. La primera barrera está conformada por juníperos, la segunda por bugambilia y la tercera, una barrera de sábila. Cada una de las barreras fue sometida a diferentes frecuencias de sonido

Las frecuencias que se consideraron se encuentran en el rango de los 100 a 800 Hz debido a que el ruido de los automóviles se encuentra en este rango de frecuencias.

Haciendo uso de sonómetros, se midieron los niveles de presión acústica generados por cada una las frecuencias. Estos sonómetros fueron colocados detrás de la barrera verde a 5 y 10 m de distancia.

Posteriormente se realizaron mediciones sin barrera, con el fin de comparar los niveles de presión acústica obtenidos con y sin barrera. Una vez registrada la información, fue necesario obtener gráficas que permitieran analizar la información obtenida.

A partir de los datos recabados en campo se obtuvo el porcentaje de atenuación con respecto a la frecuencia y la atenuación relativa con respecto a la distancia. Estos datos se mostraron a través de gráficas. Con uso de las gráficas, se logró identificar la especie que permite conseguir mayor atenuación de ruido. En este caso, la barrera más eficiente resultó ser la de sábila. Además, se identificó que, a mayores frecuencias, la barrera de sábila presenta mayor rendimiento.

En el caso de la barrera de bugambilia, esta presentó un comportamiento más homogéneo presentando mayor eficiencia de atenuación de ruido en frecuencias bajas a medias. La barrera

formada de junípero fue la barrera más eficiente en atenuaciones bajas. Esto es de gran relevancia, ya que el uso del junípero puede llegar a combatir el ruido ambiental generado por los vehículos.

La segunda gráfica que se elaboró fue la de atenuación relativa con respecto a la distancia. Para obtener esta gráfica, fue necesario obtener el promedio de cada una de las atenuaciones registradas a las diferentes frecuencias. Esta gráfica permite conocer el área que abarca la zona de sombra. El identificar esta zona de sombra permite conocer la distancia a la cual aún se puede percibir la disminución de ruido.

Con la ayuda de la gráfica de atenuación relativa con respecto a la distancia, se logró esquematizar la zona de sombra acústica para cada una de las barreras. En el caso del junípero, esta presenta menor zona de sombra debido a la altura de la barrera. Para las barreras de bugambilia y de sábila, a pesar de que ambas presentan la misma altura, la bugambilia presenta mayor distancia de zona de sombra, pero presenta menor percepción de atenuación de ruido que la sábila.

Por otro lado, también se realizó una comparación con barreras elaboradas de concreto. Al realizar esta comparación se encontró que dos de las tres barreras verdes que se analizaron no cumplen con el valor mínimo de eficiencia de pérdida de inserción de ruido. Sólo la barrera de sábila logra superar el valor mínimo de eficiencia.

A pesar de que solo una de las barreras logró cumplir con el valor mínimo de eficiencia, el uso de barreras verdes puede llegar a ser una buena alternativa para combatir el ruido ambiental. Ya que, este tipo de barreras presentan porcentajes de atenuación altos a frecuencias bajas. Esto es de gran importancia, debido a que una barrera tradicional es eficiente atenuando frecuencias medias a altas, no a frecuencias bajas, y son precisamente las frecuencias bajas generadas por los vehículos las que contribuyen en mayor cantidad a la generación de ruido ambiental.

Así mismo, el uso de vegetación en zonas urbanas puede traer beneficios como la mejora en la calidad del aire, la mitigación del efecto isla de calor y el ahorro de energía, lo cual conlleva a una mejor calidad de vida dentro de una ciudad.

Si bien, contamos con normativas que nos indican los niveles máximos permisibles de emisiones de ruido, estas normativas no sancionan a aquellos que irrumpen con lo establecido en las normas. Y por si eso fuera poco, tampoco se le da importancia a dar solución a dicha problemática ya que alguna vez, una estudiante de ingeniería escuchó a lo lejos a uno de sus compañeros decir “¿a quién le molesta el ruido?”.

Bibliografía

- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Ambiente, D. E. M., De, D. G., & Evaluacion, C. Y. (n.d.). Instrucciones para la entrega de los datos asociados a los mapas estratégicos de ruido de la segunda fase.
- Avilés López, R., & Perera Martín, R. (2017). *Manual de acústica ambiental y arquitectónica* (1ra. Edici). Madrid: Ediciones Paraninfo. Retrieved from <https://books.google.com.br/books?id=FQgaDgAAQBAJ>
- Axelsson, Ö. (2010). *Designing Soundscape for Sustainable Urban Development. Designing Soundscape for Sustainable Urban Development.*
- Azkorra, Z., P??rez, G., Coma, J., Cabeza, L. F., Bures, S., ??lvaro, J. E., ... Urrestarazu, M. (2015). Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings. *Applied Acoustics*, 89, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
- Barrandas, V. (2013). La isla de calor urbana y la vegetación arbórea. *Oikos*, 7(January 2013), 16–19.
- Brown, A. L., & Muhar, A. (2004). An approach to the acoustic design of outdoor space. *Journal of Environmental Planning and Management*, 47(6), 827–842. <https://doi.org/10.1080/0964056042000284857>
- Cabrera, P. A. (2014). *Propuesta de aislamiento acústico para los salones del laboratorio de acústica de la ESIME Zacatenco*. Instituto Politécnico Nacional.
- Camarena Berruecos, P. (2010). Xerojardinería. Guía para el diseño de los jardines de Ciudad Universitaria, 104. Retrieved from http://www.repsa.unam.mx/documentos/Camarena_2010_Xerojardineria-imprenta.pdf
- Carrión Isbert, A. (1998). *Diseño acústico de espacios arquitectónicos*. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Diseño_acústico_de_espacios_arquitect.html?id=mceSsNa6U3IC&pgis=1
- DIRECTIVA 2002/49/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 25 de junio de 2002 sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.* (2002).
- English, B. K. and C. (2001). *Environmental Noise Barriers: A Guide to their Acoustic and Visual Design.* <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2009.11.033>
- Fang, C.-F., & Ling, D.-L. (2003). Investigation of the noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 63(4), 187–195. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00190-1](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00190-1)
- Fang, C. F., & Ling, D. L. (2005). Guidance for noise reduction provided by tree belts. *Landscape and Urban Planning*, 71(1), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.01.005>
- Flores, P. (1990). Manual de acústica, ruido y vibraciones.
- Gago, E. J., Roldan, J., Pacheco-Torres, R., & Ordóñez, J. (2013). The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 25, 749–758.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.057>

- Galindo Briones, L. M. (2001). *Análisis de la contaminación ambiental por el ruido generado en obras de edificación y en vialidades urbanas*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Haan, C. H. (Chungbuk N. U., & Kim, S. D. (Chungbuk N. U. (2016). Comparison of the insertion loss of noise barriers with different shapes of upper structure (pp. 1–7). Buenos Aires.
- Halim, H., Abdullah, R., Ali, A. A. A., & Nor, M. J. M. (2015). Effectiveness of Existing Noise Barriers: Comparison between Vegetation, Concrete Hollow Block, and Panel Concrete. *Procedia Environmental Sciences*, 30, 217–221. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.039>
- Hernández Corona, A. (2014). *TESIS: ESTUDIO DE NIVELES DE PRESIÓN ACÚSTICA EN LOS ALREDEDORES DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hong, J. Y., & Jeon, J. Y. (2014). The effects of audio-visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance. *Landscape and Urban Planning*, 125, 28–37. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.001>
- Jaeger-Cueppers, M. (2011). *Noise and its Abatement*. Bonn. Retrieved from [http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB5_Environment and Health/GIZ_SUTP_SB5c_Noise-and-its-Abatement_EN.pdf](http://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB5_Environment%20and%20Health/GIZ_SUTP_SB5c_Noise-and-its-Abatement_EN.pdf)
- Jáuregui, E. (1974). Las investigaciones sobre clima urbano y contaminación del aire en la República Federal de Alemania. *Investigaciones Geográficas*, 5, 19. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111974000100004&lng=es&tlng=es.
- Kang, J. (2011). Noise Management: Soundscape Approach. *Encyclopedia of Environmental Health*, 174–184. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-52272-6.00260-9>
- Khunarsal, P., Lursinsap, C., & Raicharoen, T. (2013). Very short time environmental sound classification based on spectrogram pattern matching. *Information Sciences*, 243, 57–74. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.04.014>
- Ko, J. H., Chang, S. Il, & Lee, B. C. (2011). Noise impact assessment by utilizing noise map and GIS: A case study in the city of Chungju, Republic of Korea. *Applied Acoustics*, 72(8), 544–550. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.09.002>
- Lin, M. Y., Hagler, G., Baldauf, R., Isakov, V., Lin, H. Y., & Khlystov, A. (2016). The effects of vegetation barriers on near-road ultrafine particle number and carbon monoxide concentrations. *Science of the Total Environment*, 553, 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.035>
- Liu, F., & Kang, J. (2016). A grounded theory approach to the subjective understanding of urban soundscape in Sheffield. *Cities*, 50, 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2015.08.002>
- Maffei, L., Masullo, M., Aletta, F., & Gabriele, M. Di. (2013). Science of the Total Environment The influence of visual characteristics of barriers on railway noise perception. *Science of the Total Environment*, 445–446, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.12.025>
- Martín de Santa Olalla, F., López Fuster, P., & Calera Belmonte, A. (2005). *Agua y Agronomía*. Madrid: Ediciones Mundi Prensa.

- Martínez-Sala, R., Rubio, C., García-Raffi, L. M., Sánchez-Pérez, J. V., Sánchez-Pérez, E. A., & Llinares, J. (2006). Control of noise by trees arranged like sonic crystals. *Journal of Sound and Vibration*, 291(1–2), 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.05.030>
- Murphy, E., & King, E. A. (2014). Principles of Environmental Noise. In *Environmental Noise Pollution* (pp. 9–49). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-411595-8.00002-1>
- Nilsson, M., Bengtsson, J., & Klæboe, R. (2014). *Environmental Methods for Transport Noise Reduction*. Boca Raton: CRC Press.
- Nowak, D. J. (2006). Institutionalizing urban forestry as a “biotechnology” to improve environmental quality. *Urban Forestry and Urban Greening*, 5(2), 93–100. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.04.002>
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381–389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- Quiroz Rothe, H., & Sandoval Olascoaga, C. E. (2010). Uso y percepción de los espacios públicos de Ciudad Universitaria. *Bitácora Arquitectura*, 21, 16–25.
- Smyrnova, Y., Kang, J., Blackford, C., Cheal, C., Smyrnova, Y., Kang, J., ... Cheal, C. (2012). Diffusion coefficient of vegetation : measurements and simulation.
- Tong, Z., Baldauf, R. W., Isakov, V., Deshmukh, P., & Max Zhang, K. (2016). Roadside vegetation barrier designs to mitigate near-road air pollution impacts. *Science of the Total Environment*, 541, 920–927. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.067>
- Van Renterghem, T. (2014). Guidelines for optimizing road traffic noise shielding by non-deep tree belts. *Ecological Engineering*, 69, 276–286. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.04.029>
- Viollon, S., Lavandier, C., & Drake, C. (2001). Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Applied Acoustics*, 63(5), 493–511. [https://doi.org/10.1016/S0003-682X\(01\)00053-6](https://doi.org/10.1016/S0003-682X(01)00053-6)
- Vogiatzis, K., & Remy, N. (2014). From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe. *Science of the Total Environment*, 482–483(1), 420–431. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.098>
- Wong, N. H., Jusuf, S. K., Syafii, N. I., Chen, Y., Hajadi, N., Sathyanarayanan, H., & Manickavasagam, Y. V. (2011). Evaluation of the impact of the surrounding urban morphology on building energy consumption. *Solar Energy*, 85(1), 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.11.002>
- Yang, H., Kang, J., & Cheal, C. (2013). Random-Incidence Absorption and Scattering Coefficients of Vegetation Random-Incidence Absorption and Scattering Coefficients of Vegetation, (May). <https://doi.org/10.3813/AAA.918619>
- Yli-Pelkonen, V., Setälä, H., & Viippola, V. (2016). Urban forests near roads do not reduce gaseous air pollutant concentrations but have an impact on particles levels. *Landscape and Urban Planning*, 158(2), 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.09.014>
- Zahn, D., Scoccola, G., & Szewc, M. (2015). Cristales sónicos, 9.
- Zambrano, L., Rodríguez Palacios, S., Gil Alarcón, G., Camarena, P., & Lot, A. (2016). *La Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel: Atlas de riesgos* (2da. edici). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.

