



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Artes en Estadística Aplicada

**DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL
ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA
LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO**

Ing. Jonathan Efrén Alvarez Cacacho

Asesorado por el Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco

Guatemala, enero de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL
ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA
LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONES PROVOCADAS POR EL RUIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JONATHAN EFREN ALVAREZ CACACHO
ASESORADO POR EL MTRO. EDWIN ADALBERTO BRACAMONTE
OROZCO.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN ESTADÍSTICA APLICADA

GUATEMALA, ENERO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobar Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL DE DEFENSA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Edgar Darío Alvarez Coti
EXAMINADOR	Mtro. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
EXAMINADOR	Mtro. Luis Carlos Bolaños Méndez
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 8 de febrero de 2021.

Ing. Jonathan Efren Alvarez Cacacho

Facultad de Ingeniería

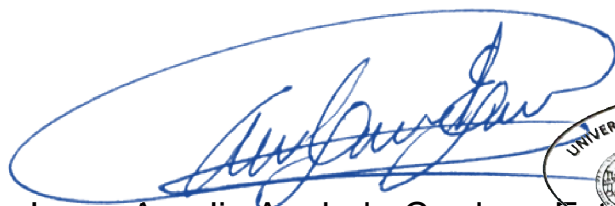
Decanato
24189101-
24189102

secretariadecanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.006.2022

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO**, presentado por: **Jonathan Efrén Álvarez Cacacho**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Estadística aplicada, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada ★

Decana

Guatemala, enero de 2022

AACE/gaoc



Guatemala, enero de 2022

LNG.EEP.OI.006.2022

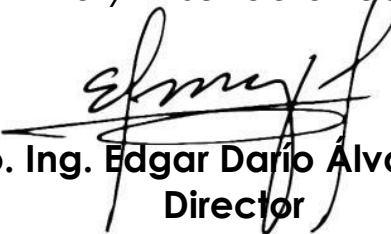
En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

“DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO”

presentado por **Jonathan Efrén Álvarez Cacacho** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Estadística aplicada** ; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería





Guatemala 30 de septiembre 2021.

M.A. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Presente

M.A. Ingeniero Álvarez Cotí:

Por este medio informo que he revisado y aprobado el Informe Final del trabajo de graduación titulado **“DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONES PROVOCADAS POR EL RUIDO”** del estudiante **Jonathan Efren Alvarez Cacacho** quien se identifica con número de carné **300231423010** del programa de Maestría en Estadística Aplicada.

Con base en la evaluación realizada hago constar que he evaluado la calidad, validez, pertinencia y coherencia de los resultados obtenidos en el trabajo presentado y según lo establecido en el *Normativo de Tesis y Trabajos de Graduación aprobado por Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería Punto Sexto inciso 6.10 del Acta 04-2014 de sesión celebrada el 04 de febrero de 2014*. Por lo cual el trabajo evaluado cuenta con mi aprobación.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.

Atentamente,

MSc. Ing. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
Coordinador
Maestría en Estadística Aplicada
Escuela de Estudios de Postgrado

Guatemala, 30 de julio de 2021.

M.A. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí

Director

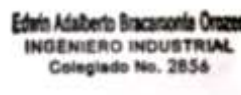
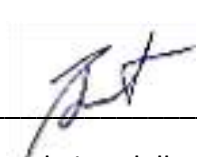
Escuela de Estudios de Postgrado

Presente

Estimado M.A. Ing. Álvarez Cotí

Por este medio informo a usted, que he revisado y aprobado el Trabajo de Graduación y el Artículo Científico: **“DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANOVA APLICADOS A LA IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL ABSORBENTE ACÚSTICO MÁS EFICIENTE DE UN SISTEMA MASA-MUELLE-MASA PARA LA PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES OCUPACIONALES PROVOCADAS POR EL RUIDO”** del estudiante **Jonathan Efren Alvarez Cacacho** del programa de Maestría en **Estadística Aplicada**, identificado con número de carné: **999003029** y CUI: **3002314230101**.

Agradeciendo su atención y deseándole éxitos en sus actividades profesionales me suscribo.



MSc. Ing. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco

Colegiado No. 2856

Asesor de Tesis

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por acompañarme siempre, ser mi guía y darme sabiduría.
Mis padres	Douglas Alvarez y Wendy Cacacho por su amor y apoyo incondicional.
Mis abuelos	Por ser parte de mi éxito, especialmente mi abuelita Olimpia García (q. d. e. p.).
Mis tíos	Por sus bendiciones y cariño en todo momento.
Mis tías	Por apoyarme, cuidarme y siempre estar conmigo, especialmente mis tías Isabel e Imelda García (q. d. e. p.).

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por brindarme la oportunidad de formarme como un profesional de esta gloriosa casa de estudios.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por brindarme el conocimiento y las herramientas profesionales necesarias.
Ing. Edwin Bracamonte	Por apoyarme a seguir una maestría y por su asesoría en este trabajo.
Ing. William Fagiani	Por su importante ayuda y consejos en su experiencia como experimentador.
Mis compañeros de la maestría	Por hacer de estos años, una experiencia amena.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XIII
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XV
OBJETIVOS.....	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN	XXXV
1. MARCO REFERENCIAL	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Diseño y análisis de experimentos	7
2.1.1. Prueba de hipótesis para datos pareados.....	9
2.1.2. Análisis de varianza de un factor	11
2.1.3. Supuestos que debe cumplir un análisis de varianza	17
2.1.3.1. Prueba de normalidad de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	18
2.1.3.2. Prueba de normalidad de <i>Shapiro- Wilks</i>	19
2.1.3.3. Prueba de homocedasticidad de <i>Bartlett</i>	20
2.1.3.4. Prueba de independencia de <i>Durbin-Watson</i>	21

2.1.4.	Contrastes para medias en experimentos de un factor.....	22
2.1.4.1.	Método de diferencia mínima significativa.....	22
2.1.4.2.	Método de <i>Tukey</i>	23
2.1.4.3.	Método de <i>Duncan</i>	24
2.1.4.4.	Método de Hsu.....	25
2.1.5.	Diseño en bloques completos al azar	26
2.1.6.	Diseños factoriales	28
2.1.7.	Análisis de varianza para dos factores	29
2.1.8.	Covariables.....	30
2.2.	El ruido	31
2.2.1.	Tipos de ruido	32
2.2.2.	Medición del ruido.....	33
2.2.3.	Legislación internacional y nacional sobre ruido....	34
2.2.4.	Prácticas en el control de ruido en la industria	37
2.2.4.1.	Sistemas masa-muelle-masa	38
2.2.4.2.	Espuma acústica.....	40
2.2.4.3.	Panales acústicos	41
2.2.5.	Enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido	41
3.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	43
3.1.	Efecto de la cámara acústica	43
3.2.	Diseño experimental de la fibra, espuma y textil	45
3.2.1.	Comprobación de supuestos del análisis de varianza	45
3.2.2.	Análisis de varianza de dos factores, dos bloqueos y una covariable	49

3.2.3.	Contraste LSD, <i>Tukey</i> y <i>Duncan</i> para los tipos de materiales	53
3.3.	Diseño experimental de la fibra, espuma, textil y cartón	57
3.3.1.	Comprobación de supuestos del análisis de varianza	57
3.3.2.	Análisis de varianza de 4x3, con dos bloqueos y una covariable.....	61
3.3.3.	Contraste de Hsu para los tipos de material	65
4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	67
4.1.	Análisis interno	67
4.1.1.	Efecto del espesor	67
4.1.2.	Comparación entre los tipos de materiales	70
4.1.3.	Interacción entre el factor espesor y el factor tipo de material	72
4.1.4.	Efecto de la temperatura como una covariable	75
4.1.5.	Efecto de los factores de bloqueo	76
4.2.	Análisis externo	77
	CONCLUSIONES	79
	RECOMENDACIONES.....	81
	REFERENCIAS	83
	APÉNDICES	87
	ANEXO	97

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cámara acústica	XXV
2.	Mediciones radiales	XXVII
3.	Estructura del diseño factorial 3^2	XXVIII
4.	Plano del diseño experimental	XXIX
5.	Diseño experimental real	XXX
6.	Materiales evaluados	XXXIII
7.	Modelo general experimental	7
8.	Diseño de un análisis de un factor	11
9.	Criterio de decisión F de Fisher	15
10.	Zona de aceptación y rechazo <i>Kolmogorov-Smirnov</i>	19
11.	Decibelímetro	34
12.	Comportamiento del ruido	38
13.	Estructura sistema masa-muelle-masa	40
14.	Histograma de diferencias para datos pareados	44
15.	QQ Plot datos sin transformar	46
16.	QQ Plot datos transformados	47
17.	Gráfico de efectos principales ANOVA 1	51
18.	Gráfico de interacción del ANOVA 1	52
19.	QQ Plot ANOVA II Datos sin transformar	58
20.	Intervalo de confianza <i>Box-Cox</i>	59
21.	Datos transformados por <i>Box-Cox</i>	60
22.	Gráfico de efectos principales ANOVA 2	63
23.	Gráfico de interacción ANOVA 2	64

24.	Gráfico Hsu para el espesor	65
25.	Gráfica Hsu para el material	66
26.	Gráfico de efectos factor espesor ANOVA 1.....	68
27.	Gráfico de efectos factor espesor ANOVA 2.....	69
28.	Gráfico de efecto del tipo de material ANOVA 1	70
29.	Gráfico de efecto del tipo de material ANOVA 2.....	72
30.	Gráfico de interacciones ANOVA 1.....	73
31.	Gráfico de interacciones ANOVA 2.....	75

TABLAS

I.	Variables del estudio.....	XXIII
II.	Resumen análisis de varianza de un factor	16
III.	Resumen análisis de varianza diseño en bloques	27
IV.	Resumen análisis de varianza de dos factores.....	29
V.	Resumen análisis de covarianza	31
VI.	Nivel y tiempo máximo de exposición	36
VII.	Resultados prueba pareada.....	44
VIII.	Pruebas de normalidad datos sin transformar	45
IX.	Pruebas de normalidad datos transformados	47
X.	Prueba de homocedasticidad	48
XI.	Prueba de independencia	49
XII.	Diseño factorial 3^2 con covariable y dos bloqueos.....	50
XIII.	Prueba de falta de ajuste	53
XIV.	Prueba LSD para el espesor.....	53
XV.	Prueba LSD para el material.....	54
XVI.	Prueba LSD para interacción material*espesor	54
XVII.	Prueba <i>Tukey</i> para el espesor	55
XVIII.	Prueba <i>Tukey</i> para el material	55
XIX.	Prueba <i>Tukey</i> para interacción material*espesor	55

XX.	Prueba <i>Duncan</i> para el espesor.....	56
XXI.	Prueba <i>Duncan</i> para el material.....	56
XXII.	Prueba <i>Duncan</i> para interacción material*espesor	56
XXIII.	Prueba de homocedasticidad.....	60
XXIV.	Prueba de independencia	61
XXV.	Diseño factorial 4x3 con covariable y dos bloqueos.....	62
XXVI.	Prueba de falta de ajuste	65

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
dB	Decibeles
S_d	Desviación estándar muestral
σ	Desviación estándar poblacional
β	Distancia radial
χ_0^2	Distribución Chi Cuadrado
t_0	Distribución t de Student
F	Distribución F de Fisher
ϵ	Espesor
v_ϵ	Grados de libertad del error
v_T	Grados de libertad del fenómeno
v_τ	Grados de libertad del tratamiento
H_1	Hipótesis alterna
H_0	Hipótesis nula
$\bar{d}$	Media muestral
μ	Media poblacional
mm	Milímetros
L	Nivel de exposición al ruido
t	Niveles del factor
r	Repeticiones por factor.
T	Temperatura
Δt	Tiempo máximo de exposición

GLOSARIO

ANOVA	Análisis de Varianza.
Decibeles	Unidad utilizada para cuantificar la intensidad del ruido.
Efluente	Salida de aguas residuales con desechos sólidos.
Experimento	Cambios en las condiciones de un proceso o sistema para medir el efecto en el resultado.
Factor	Variables que se investigan en un experimento, con el fin de identificar su influencia en el resultado.
Homocedasticidad	Condición de varianza constante a lo largo del tiempo para todo análisis de varianza.
Hsu	Es un método de comparaciones múltiples diseñado para identificar los mejores niveles de los factores, los que son insignificamente diferentes del mejor y los que son significativamente diferentes del mejor.
<i>Kolmogorov</i>	Prueba de bondad para estimar el ajuste a una distribución normal.

Muestra pareada	Muestras que se obtienen por pares y no son independientes.
Nivel	Diferentes valores que se asignan a cada factor estudiado en un diseño de experimentos.
Post Hoc	Análisis de Varianza.
Potencia de prueba	Probabilidad de que la hipótesis nula no sea aceptada cuando la hipótesis alternativa es verdadera
Ruido	Sonido inarticulado sin ritmo y genera incomfort.
Tratamiento	Combinación de los niveles de todos los factores estudiados en el experimento.

RESUMEN

El propósito de este trabajo fue identificar qué tipo de material absorbente acústico y que nivel de espesor es el más eficiente en los sistemas de masa-muelle-masa y con ello lograr la prevención de las enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

El objetivo es determinar que material entre cuatro opciones de mayor aplicación; tenía la mejor absorción acústica estimada a través de un diseño experimental, análisis de varianza y pruebas post hoc.

Para establecer la metodología se evaluó cuatro tipos de materiales de mayor aplicación y se identificó cuál de estos tenían la mejor absorción acústica estimada a través de la tasa media de transmisión mediante un diseño experimental de análisis de varianza y pruebas post hoc. El diseño experimental realizado tuvo un alcance de tipo descriptivo y correlacional.

Se identificó que el tipo de material de lana de roca con espesor mayor a nivel de 100 milímetros es la combinación adecuada para la correcta mitigación del ruido en el uso de los sistemas masa-muelle-masa. Además, se descartó el uso de algodón, poliestireno o cartón de huevera como materiales óptimos en la absorción acústica.

Se concluyó que los materiales de fibra, específicamente la lana de roca es un adecuado aislante acústico, demostrándose que entre mayor es el espesor de este material, mejor es la mitigación al ruido que se obtiene, recomendando que en todo diseño experimental se tomen en cuenta posibles factores de bloqueo o

covariables que de omitirse pueden sesgar las conclusiones de los datos obtenidos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A continuación, se detallan las diferentes fases del planteamiento del problema indicado:

- Contexto general

Las enfermedades ocupacionales afectan cada vez más a diferentes sectores laborales, existiendo una gran variedad de estas. Entre las enfermedades más comunes se encuentran: túnel carpiano, pérdida auditiva, fatiga, obesidad, lumbalgia, gastritis, entre otras. El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) de España presentó en el año 2017 un estudio donde las enfermedades ocupacionales que provocan pérdida auditiva debido al ruido en el ambiente ocupan el segundo lugar con un porcentaje del 29.74 %, detrás del túnel carpiano que tiene el primer puesto del estudio.

Muchas empresas por desconocimiento o muchas veces por falta de estudios técnicos adecuados no proveen un ambiente laboral acústicamente ergonómico, desarrollando malas prácticas para mitigar el ruido, principalmente en la elaboración de sistemas masa-muelle-masa. Estos sistemas sirven para encerrar una fuente ruidosa absorbiendo las ondas acústicas por medio de un material denominado muelle. Los materiales más comúnmente usados como muelle son las fibras (lana de roca), las espumas (poliuretano) y los textiles (algodón), pero existe una discrepancia de criterios para determinar cuál material es el más eficiente. En los últimos años también ha surgido un enfoque ecológico que busca utilizar el cartón como muelle, pero industrialmente este material ha sido muy mal criticado. Otro problema que se presenta en la evaluación de estos

materiales absorbentes es determinar que tanto efecto tiene el espesor del muelle en la absorción del ruido.

Por esta razón se hace necesario e importante identificar cuales materiales son los más eficientes para usarse en los sistemas de absorción y que efecto tiene el espesor del muelle en la absorción acústica de cada material.

- Descripción del problema

Pequeñas y medianas empresas desconocen algunas prácticas económicamente eficientes en la absorción del ruido de diferentes fuentes, una de las prácticas más comunes son los sistemas masa-muelle-masa. Estos sistemas sirven para encerrar una fuente ruidosa absorbiendo las ondas acústicas por medio de un material denominado muelle. Lamentablemente el material absorbente usado como muelle muchas veces no es el más eficiente y esto provoca un sistema incompleto y deficiente en la absorción acústica. Un ejemplo del uso de materiales deficientes es el actual uso del cartón como muelle absorbente.

Es por ello por lo que se requiere un estudio experimental sobre la eficiencia de las clases de materiales absorbentes, estableciendo estadísticamente los contrastes de comparación de las tasas medias de transmisión acústica, tomando en cuenta el efecto del espesor con el fin de identificar la mejor metodología en la mitigación del ruido por medio de los sistemas masa-muelle-masa y en la búsqueda de la disminución de enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

- Formulación del problema

En este apartado se planteó la pregunta central de investigación y las preguntas auxiliares que sirvieron de guía en el diseño de experimento.

Pregunta central:

¿Cuál es el material que presenta la mejor absorción acústica evidenciada en la tasa media de transmisión en un sistema masa-muelle-masa?

Preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el efecto sobre la tasa media de transmisión acústica provocado por el espesor del material?
- ¿Cuáles son las diferencias significativas entre las tasas de transmisión de ruido entre la lana de roca (fibra), el poliestireno (espuma), el algodón (textil)?
- ¿Cuál es la diferencia significativa en la tasa de transmisión del cartón en forma de huevera frente a los otros materiales?

- Delimitación del problema

El objeto de estudio es un material absorbente acústico con cuatro opciones a evaluar, para las fibras se utilizará la lana de roca, para las espumas el poliestireno, para los textiles el algodón y el cartón como una clase extra. Las condiciones donde se analizó el problema fueron bajo temperatura ambiente y en una jornada nocturna donde el ruido del ambiente fue no significativo.

OBJETIVOS

General

Determinar cuál material, entre las cuatro opciones de mayor aplicación, tiene la mejor absorción acústica estimada a través de la tasa media de transmisión mediante un diseño experimental, análisis de varianza y pruebas post hoc para lograr reducir futuras enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido.

Específicos

- Comparar diferentes niveles del factor espesor mediante un análisis de varianza para inferir si existe un efecto significativo en la tasa media de transmisión de cada material.
- Contrastar las diferencias en las tasas medias de transmisión de la lana de roca, el poliestireno y el algodón mediante un análisis de varianza y pruebas post hoc para identificar cual es el mejor.
- Comparar la tasa media de transmisión del cartón contra los otros materiales evaluados mediante un análisis de varianza y la prueba de Hsu para identificar su funcionalidad limitada.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

A continuación, se especifica las características del estudio cuantitativo, las respectivas unidades y variables de análisis que se estudiaron en el desarrollo del experimento y las fases secuenciales que integraron al mismo.

- Características del estudio

El enfoque del estudio realizado fue mixto, debido a que las variables que fueron medidas tanto las controladas como las no controladas corresponden a magnitudes numéricas y se tienen niveles de tipo cualitativo. Estas variables se encuentran asociadas al tipo de material acústico, su espesor, la temperatura del ambiente y la tasa media de transmisión acústica.

El diseño adoptado fue experimental debido a que se manipuló el comportamiento de la variable categórica tipo de material y la variable espesor para obtener información de las diferencias significativas entre tipos de materiales. En el experimento se seleccionó los tratamientos, niveles y repeticiones, en función de los objetivos planteados y del esquema de solución. Además, se identificó la covariable temperatura pues podía tener una correlación significativa con la variable respuesta.

El alcance fue descriptivo y correlacional dado que se analizó el comportamiento de la variable continua tasa media de transmisión acústica según el tipo de material, además se identificó una relación significativa entre el tipo de material, su espesor, la temperatura del ambiente y la distancia y ángulos radiales. El tipo de estudio fue descriptivo y explicativo.

- Unidades de análisis

Cada unidad de análisis consistió en la medición de la tasa de transmisión acústica para cada tipo de material con su respectivo espesor. Debido a que la variable de medición y la covariable del diseño son asociados a los números reales, entonces se asumió estadísticamente una población infinita.

Aunque el experimento fue aleatorizado siempre existirá un número infinito de posibles resultados, estos fueron muestreados por el aleatorio simple.

- Variables

Las variables involucradas en el experimento fueron; la tasa media de transmisión acústica, el espesor, la temperatura del ambiente, los diferentes tipos de materiales absorbentes que se contemplarán en el diseño experimental, la distancia radial y ángulo de la medición. La tasa media de transmisión acústica, el espesor, la distancia radial y el ángulo son variables cuantitativas continuas que poseen un nivel de medición de razón. La temperatura del ambiente es una variable cuantitativa continua, pero con un nivel de medición de intervalo. Finalmente, el tipo de material es una variable cualitativa con un nivel de medición nominal.

En la siguiente tabla se describen las variables de estudio y sus respectivas notaciones en símbolo. Además, a cada variable se le agregó su definición teórica y la definición operativa. Esta última es muy importante debido a que establece la forma y la dimensional en que se midió la variable de estudio.

Tabla I. **Variables del estudio**

Variable	Definición teórica	Definición operativa
Tasa media de transmisión acústica (T_a)	Variable continua que cuantifica la cantidad de sonido que se transmite de una fuente sonora a un punto en el espacio y que no se ve afectada por la reflexión o absorción acústica.	Medición directa por medio de un decibelímetro. La unidad de medición es el decibel (dB). Número real en la escala de razón.
Espesor (ε)	Variable cuantitativa continua que hace referencia a la dimensión más pequeña de un cuerpo en tres dimensiones, un sinónimo es el grosor de un cuerpo.	Medición directa por medio de un Vernier. La unidad de medición es en centímetros (mm). Número real en la escala de razón.
Temperatura del ambiente (T)	Variable cuantitativa continua que representa el estado del ambiente, que se manifiesta en el aire y se encuentra asociada a la transferencia de calor en los cuerpos. Existen temperaturas que ergonómicamente se prefieren en lugares cerrados.	Medición directa por medio de un termómetro digital. La unidad de medición es en la escala relativa de grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Número real en la escala de intervalo.
Tipos de materiales absorbentes	Evitan la reflexión del sonido que incide sobre estos y dependen de las necesidades presentadas en la mitigación de la contaminación sonora.	Dependerá de las características propias de cada material: fibra, espuma o textil. Escala nominal categórica.
Distancia y ángulo radial	Variables cuantitativas de tipo continua que representan la coordenada bajo la cual se hizo la medición.	Ambas son mediciones directas, la distancia se midió en centímetros y el ángulo en grados.

Fuente: elaboración propia, Word.

- Fases del estudio

A continuación, se detallan las diferentes fases involucradas para la elaboración del diseño experimental.

- Fase 1: revisión de literatura

Primero se detallan los diferentes fundamentos sobre el ruido y enfermedades ocupacionales involucrados en el estudio.

Se explicó mediante definiciones y estándares determinados en normas internacionales, así como el Acuerdo Gubernativo 229-2014 que regula la salud y seguridad ocupacional en territorio guatemalteco. Además, se detallaron las prácticas más comunes en la mitigación del ruido en la industria y el uso del decibelímetro, termómetro digital y Vernier.

Los fundamentos estadísticos se trabajaron de la siguiente forma:

Se realizó una revisión de los conceptos y la aplicación de los diferentes diseños experimentales que se podían aplicar al estudio. Se identificó los tratamientos, niveles, bloques y covariables según lo requerían los objetivos y la aplicación del estudio.

- Fase 2: gestión para la recolección de la información

Para esta fase se realizó el siguiente procedimiento para la recolección de los datos:

- Selección de los instrumentos de medición:

Considerando el factor económico y la precisión requerida, fueron adquiridos un decibelímetro, un vernier y un termómetro digital.

- Elaboración de la cámara acústica:

La cámara acústica se realizó manualmente con duroport, las uniones fueron selladas con pegamento verde debido a que permitió el aislamiento acústico y así evitar filtraciones sonoras que pueden afectar la medición del ruido. Se hicieron diferentes prototipos de cámara acústica, en cada uno se variaron tamaños y espesores.

Figura 1. **Cámara acústica**



Fuente: elaboración propia, Cimera.

- Pruebas previas y correcciones:

Se realizó por medio de una prueba paramétrica de datos pareados la medición de ruido con el fin de comprobar que la tasa de absorción del duroport elegido en la cámara contenedora era insignificante. Para esto se colocó una fuente sonora que simulaba la operación de un torno en el centro de un plano con 3 círculos de 60, 80 y 100 centímetros de radio y se tomaron mediciones acústicas cada 90 grados dentro de cada plano radial.

Posteriormente la fuente sonora se colocó en la cámara contenedora y se repitieron las mediciones acústicas en las mismas posiciones al ensayo anterior, estos valores fueron la respuesta de la prueba de datos pareados. Se hizo el contraste con la prueba de hipótesis:

$$H_0: \mu_{Ta_0} = \mu_{Ta_1}$$

$$H_a: \mu_{Ta_0} \neq \mu_{Ta_1}$$

Se determinó finalmente el espesor y características del material de la cámara contenedora que hacían que la hipótesis nula se aceptara, las dimensiones adecuadas que no tenían un efecto significativo sobre la medición son de 30 centímetros de alto, 30 centímetros de ancho y 30 centímetros de largo. Identificado el diseño se procedió a realizar el diseño experimental.

Figura 2. **Mediciones radiales**



Fuente: elaboración propia, Cimera.

- Fase 3: recolección de la información

Cuando el efecto de la cámara contendedora fue no significativo por las mediciones determinadas, entonces se procedió a realizar el diseño factorial considerando lo siguiente:

- El factor 1 fue el tipo de material absorbente acústico, sus niveles serán; la fibra, la espuma y el textil. Para la otra variante del diseño experimental se agregará el cartón como nivel adicional.
- El factor 2 fue el espesor del material; este tendrá tres niveles: 50, 75 y 100 milímetros. Estos valores fueron seleccionados tomando de referencia la Norma UNE-EN 13162:2002, esta norma establece que el espesor de los

materiales que serán sometidos a ensayos acústicos debe estar entre 20 y los 100 milímetros.

- Se identificó algún posible efecto de la temperatura ambiente como una covariable.
- Se midieron dos factores de bloqueo que podían tener un efecto significativo en medición de la tasa acústica, estos fueron la distancia radial (β) que tomó los valores de 60, 80 y 100 centímetros, y el segundo bloqueo fue el ángulo de la medición (α) que tomó valores de 0, 90, 180 y 270 grados.

La estructura del primer diseño factorial sin incluir el contraste comparativo con el cartón de huevera fue el siguiente:

Figura 3. **Estructura del diseño factorial 3²**

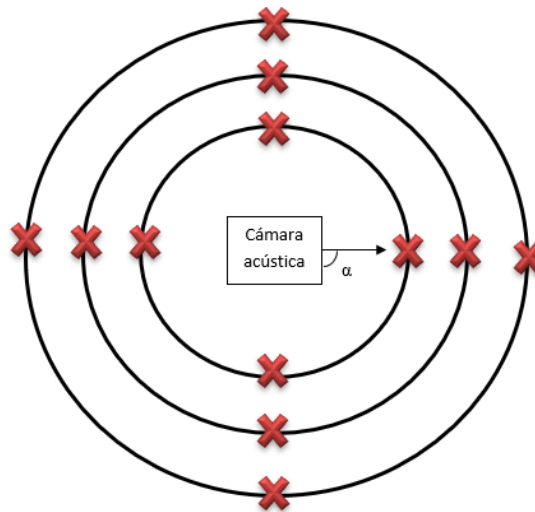
Espesor (mm)	Tipo de material		
	Fibra	Espuma	Textil
50	X, β , α	...	...
75	...	...	...
100	...	...	...

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Se procedió a seleccionar los puntos de medición aleatorios dentro de un de los 3 radios y los 4 ángulos establecidos del plano que rodeaba a la cámara

contenedora y se midió con el decibelímetro las tasas de transmisión acústica mientras se variaba el tipo de material y su respectivo espesor. En las siguientes figuras se puede comparar el plano del diseño con el experimento real:

Figura 4. **Plano del diseño experimental**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Figura 5. **Diseño experimental real**



Fuente: elaboración propia, Címera.

- Fase 4: análisis de información

Para realizar el análisis de la información se utilizaron diferentes softwares que facilitaron los cálculos estadísticos.

- Análisis gráfico:

Para esto se buscó utilizar gráficos que representaran el comportamiento de las tasas de transmisión acústica, como el gráfico QQ Plot, histogramas y graficas de efectos principales e interacciones.

- Análisis de varianza del diseño factorial y la covariable:

Primero se verificó los supuestos de independencia por medio de la prueba de *Kolmogorov-Smirnov*, los de homocedasticidad por medio de la prueba de

Bartlett y los de independencia por medio de la prueba *Durbin Watson*, estas pruebas analizaron los residuos en las tasas medias de transmisión acústica. Posteriormente mediante el cálculo y comparación de la distribución F de *Fisher* se sometieron a prueba la siguiente hipótesis, estas hipótesis son la misma en los dos diseños factoriales que se plantearon a un 95 % de confianza:

- ✓ Ho: el efecto de los diferentes tipos de materiales sobre la tasa de transmisión acústica es significativo.
- ✓ Ha: el efecto de los diferentes tipos de materiales sobre la tasa de transmisión acústica es no significativo.
- ✓ Ho: el espesor tiene un efecto significativo en la tasa de transmisión acústica.
- ✓ Ha: el espesor no tiene un efecto significativo en la tasa de transmisión acústica.
- ✓ Ho: es significativa la interacción entre el tipo de material y el espesor.
- ✓ Ha: no es significativa la interacción entre el tipo de material y el espesor.
- ✓ Ho: la temperatura ambiente tiene un efecto significativo sobre la tasa de transmisión acústica.

- ✓ Ha: el efecto de la temperatura sobre la transmisión acústica no es significativo.

- Pruebas post-hoc para un factor:

Para comparar las diferencias entre los niveles del factor categórico asociado al tipo de materiales se usaron las siguientes pruebas:

- Comparaciones con la prueba LSD
- Comparaciones con la prueba de *Tukey*
- Comparaciones con la prueba de *Duncan*
- Comparaciones de un nivel contra los demás niveles por medio de la prueba de Hsu.

Se contrastó el primer ANOVA con los 3 tipos de material con los resultados de la prueba LSD, *Tukey* y la de *Duncan*, se identificaron diferencias, pero la principal es la prueba LSD debido a que tiene mayor potencia, donde se estimaron las diferencias significativas entre los diferentes niveles del factor y se determinó el mejor material absorbente del experimento. En el segundo ANOVA solo se realizó la prueba post hoc de Hsu donde nuevamente se determinó el mejor material absorbente del experimento.

Figura 6. **Materiales evaluados**



Fuente: elaboración propia, Cimera.

- Fase 5: interpretación de información

Con los resultados que se obtuvieron, se buscó estimar cuál de los tipos de materiales es el mejor en la absorción acústica, así como la relación del espesor con la tasa de transmisión acústica.

Además, se evaluó si la temperatura ambiente tiene algún efecto significativo no controlado durante la realización del experimento y si los factores de bloqueo eran significativos en la contribución de error al análisis de varianza.

- Fase 6: elaboración del informe final

Los resultados fueron analizados e interpretados en el informe final, incluyendo los gráficos y la información relevante del diseño experimental.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fue una sistematización de un análisis experimental bajo el cual se buscó determinar el mejor tipo de material absorbente acústico.

Las enfermedades ocupacionales provocadas por el ruido tienen los mayores índices de presencia en el campo de la industria, esto debido a malas prácticas en la absorción acústica, especialmente al utilizar sistemas masa-muelle-masa. El muelle lo representa el material absorbente a utilizar, pero muchas veces el material elegido no es el adecuado. Otro problema que ha surgido es el uso erróneo del cartón de huevera como un absorbente eficiente.

Es por ello por lo que se realizó un diseño experimental para inferir que tipo de material absorbente funcionaba como muelle de forma más eficiente, dicho experimento tuvo como factores fijos el espesor y el tipo de material, la temperatura como una covariable, la distancia radial y el ángulo de medición como factores de bloqueo.

Con esto lo que se buscó fue encontrar el mejor material absorbente entre las espumas, textiles y fibras para ser utilizado como muelle y así presentar una alternativa eficiente que reduzca el índice de las enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido. Las técnicas utilizadas fueron el análisis de varianza, las pruebas post hoc y el análisis gráfico de efectos principales e interacciones.

Durante el desarrollo del diseño experimental se realizaron diferentes fases, empezando con la revisión de la literatura, gestionando y obteniendo la

recolección de la información, para finalmente realizar el análisis de la información, la interpretación, conclusiones y recomendaciones.

Se concluyó que los factores principales tipo de material y espesor fueron significativos, siendo el tipo de material fibra de lana el mejor aislante acústico que en interacción con el mayor espesor se generó la mejor mitigación del ruido, el diseño experimental fue factible y no se tuvieron inconvenientes.

El informe final del estudio está estructurado en 4 capítulos: en el primer capítulo se desarrolló el marco referencial donde se explicaron algunos estudios previos relacionados a la mitigación del ruido y a los diseños experimentales en diferentes campos de aplicación; en el segundo capítulo se expuso todo el marco teórico y se encuentra dividido en dos secciones, la primera sección está integrada por los conceptos estadísticos referentes al diseño de experimentos y análisis de varianzas. En la segunda sección del capítulo se desarrolló toda la teoría referente al ruido y enfermedades ocupacionales provocadas por este; en el tercer capítulo se expusieron los resultados obtenidos de los diseños experimentales, del análisis de varianza, de los contrastes post hoc y de las pruebas de hipótesis desarrolladas en la investigación.; el cuarto capítulo contiene la discusión de los resultados obtenidos con los que se elaboraron las conclusiones y recomendaciones de la investigación propuesta.

1. MARCO REFERENCIAL

El diseño de experimentos hace referencia a la manipulación de un proceso determinado, por medio de la aplicación de una serie de técnicas que buscan proporcionar información, al cambiar las variables de estudio y sus interacciones con ciertos factores controlables y no controlables. A continuación, se analizarán algunos conceptos y estudios enfocados en la aplicación e importancia de los diseños de experimentos, así como recomendaciones metodológicas en este tipo de investigaciones.

Establece Gutiérrez (2012):

Las ventajas de un diseño factorial, ya que estos diseños permiten analizar los efectos individuales y las interacciones con los factores del experimento, además se logra una exploración más completa donde las interpretaciones y el cálculo de los efectos se pueden analizar con aritmética elemental. (p. 18)

La importancia según Montgomery (2004) de las covariables en todo diseño de experimento, es mejorar la precisión de este ya que busca determinar el efecto de un factor perturbador no controlable en las corridas del experimento.

Pérez (2014) proponen una metodología eficiente para trabajar un diseño de experimento, dicha metodología la aplicó en su trabajo que buscaba explicar cuáles factores afectan al rendimiento del requesón en las empresas lácteas. Lo primero que proponen es que se deben identificar todos los factores que afectan a la variable a estudiar, luego se debe elegir el diseño propio del experimento.

Posteriormente se debe planear el experimento definiendo los tratamientos, los factores y los niveles, seguidamente se ejecuta. Posteriormente se debe planear el experimento definiendo los tratamientos, los factores y los niveles, seguidamente se ejecuta. Finalmente se debe realizar el análisis de varianza y las pruebas post hoc adecuadas para determinar la significancia de las diferencias entre los niveles de las variables de estudio.

Esto se encuentra también respaldado por Hernández (2018) quien enfoca la metodología en los diseños factoriales especificando que se deben plantear los objetivos adecuados para analizar experimentalmente el efecto causado sobre las variables dependientes debido a la manipulación de más de una variable independiente. Con base a esta metodología se trabajó el diseño experimental del proyecto.

Inche, Chung y Chia (2010) realizaron un diseño de experimento de diferentes materiales acústicos para inferir que material tiene la mayor absorción acústica. El experimento consistió en diseñar una cámara cúbica rodeada internamente por dos materiales absorbentes acústicos, en el interior colocaron una fuente con un nivel de intensidad de 101.9 decibeles. Se trabajaron tres factores el espesor, el tipo de material y la densidad, en conjunto se midieron las intensidades acústicas en decibeles y el estudio concluyó que la lana de roca tiene una mejor tasa de absorción frente al material textil. Este artículo fue la base metodológica del experimento, debido a que se replicó el uso de una cámara cúbica rellena internamente por el material absorbente y dentro de ella se colocó una fuente de ruido.

Porras (2015) realizó un estudio con diferentes materiales absorbentes para determinar sus ventajas y desventajas. Algunas de las ventajas evidenciadas en su estudio para la lana de roca incluyen el hecho de ser un material económico,

además se evidenció un aumento en la absorción acústica provocado por un incremento en el espesor y por lo tanto en la densidad, pero presenta ciertas desventajas, entre ellas que siempre debe ser usada en un sistema masa-muelle-masa debido a que requiere protección de las personas pero también se tiene que proteger a la exposición directa pues tiene fibras que al respirarse pueden causar problemas pulmonares, por esta razón siempre debe ir entre dos materiales de mayor densidad por seguridad. En dicho estudio se determinó que el poliestireno como aislante acústico es muy pobre y que lamentablemente se sigue utilizando en masa como un material eficiente. Finalmente se determinó que los materiales porosos son los que evidencian las mejores características absorbentes. Es por esta razón que, dentro de los materiales a contrastar en el diseño de experimentos, se eligió la lana de roca como una fibra porosa y al poliestireno como una espuma.

Tanco y Ilzarbe (2008) establecieron en su estudio referente al uso de diseños experimentales en los procesos de automoción, como debe de planificarse el análisis estadístico para variables continuas y especificaron una metodología propuesta para identificar los factores y niveles del experimento tanto cuantitativos como cualitativos. Esta planificación sirvió de criterio para establecer cuáles son los factores y niveles cuantitativos o cualitativos que tengan un efecto en el diseño experimental propuesto.

La Fundación Española Vida Sostenible (2015) realizó un artículo donde expone las aplicaciones de diferentes materiales absorbentes, pero además es uno de los primeros artículos que exhibe al cartón como un material que tiene una capacidad de absorción acústica considerable pero que por sí solo es un material pobre y necesita un refuerzo para lograr la mitigación sonora, además se concluyó que el cartón solo es capaz de absorber eco, pero no ruido. Debido a esto se agregó el cartón como otro nivel de comparación entre el factor tipo de

material absorbente, para respaldar la conclusión de su limitada capacidad de absorción.

El Centro de Calidad Ambiental Mexicano (1992) publicó la Norma DGN-AA-43-1977, donde se especifica el procedimiento a seguir para la medición del ruido de una fuente fija. Primero se debe de tener calibrado el equipo de medición y la fuente debe de encontrarse como mínimo a 1.20 metros de distancia del suelo. Luego deben hacerse como mínimo 5 mediciones en diferentes puntos, a un radio de 20 centímetros de la fuente, esto se hace debido a que la fuente sonora se encontrará confinada en una cámara cúbica. Con este procedimiento se buscó aplicar el diseño experimental que más convenía dependiendo del tipo de estudio y de los objetivos que se plantearon.

Castellanos y Cortés (2010) especifican ciertas condiciones adecuadas que se deben mantener en la medición del ruido, las más destacas son las siguientes; primero las mediciones deben realizarse en un entorno libre, un campo libre de reflexiones de otras fuentes sonoras es por ello por lo que se recomienda el ambiente nocturno como el mejor entorno de medición. En este estudio utilizaron la frecuencia de resonancia como un factor único y el uso de resonadores para la medición, a pesar de que la metodología utilizada difiere de la que se propone en este estudio, el objetivo es el mismo, pues se busca determinar que material es el más eficiente. El estudio concluyó que los materiales con mayor cantidad de perforaciones (poros) logran absorber de una mejor manera el ruido y esta condición la cumplen mayormente las fibras.

Quispe (2014) en su trabajo sobre un diseño experimental determina las combinaciones de arcilla como materiales absorbentes en efluentes industriales, utiliza los diseños factoriales y sus respectivas ecuaciones de los modelos para determinar el más adecuado. Además, describe gráficamente la interpretación de

estos diseños y establece un procedimiento adecuado para trabajar diseños codificados. Este trabajo se hace importante para poder representar e interpretar gráficamente el modelo factorial que se planteó en el experimento.

Salgado (2011) realizó un diseño experimental basado en el estudio de superficies de respuesta de residuos de madera y de plástico para lograr la optimización de estos materiales, en su trabajo establece la metodología adecuada para verificar que los supuestos de un ANOVA se cumplan: los datos deben ser homocedásticos, son poblaciones normales y los tratamientos son independientes. Para la igualdad de varianzas se debe utilizar la prueba de Bartlett y para evaluar la normalidad se puede hacer con una prueba de *Kolmogorov*, en este trabajo también se enfocan en el método de análisis gráfico para los tres supuestos. Por medio de esta referencia se logró establecer la metodología adecuada de evaluación para cada uno de los supuestos a verificar.

Villalpando (2001) presentó un artículo donde define las mejores pruebas para hacer un análisis post hoc posterior al análisis de varianza del diseño experimental. Estas pruebas difieren entre ellas por el fin para el que fueron diseñadas; *Tukey*, *Duncan*, *Dunnett*, *Hsu* y *Bechhofer*. La prueba de *Hsu*, resultó ser la más robusta, mientras que *Dunnett* destacó en los experimentos donde se tiene un grupo de control. De todas las opciones antes mencionadas, la prueba de *Tukey* evidenció ser la más potente. Este artículo buscó evidenciar las pruebas post hoc más eficientes para concluir adecuadamente las hipótesis alternativas de diferencias aceptadas. Además, permitió conocer las diferentes bondades y las potencias de cada prueba, identificando la posibilidad de seleccionar la prueba más adecuada al diseño experimental que se llevó a cabo.

Se concluye que un diseño de experimentos tiene una gran aplicación, pues es una fuente de conocimiento eficiente, por medio del cual se puede determinar

la relación, efectos y diferencias significativas de las variables de interés y cómo son afectadas al modificar los diferentes factores controlables o no controlables. Es importante el análisis de varianza y de las pruebas post hoc adecuadas para poder interpretar adecuadamente el conocimiento adquirido propio del diseño del experimento y bajo el cual se pretenden explicar los comportamientos de ciertos fenómenos.

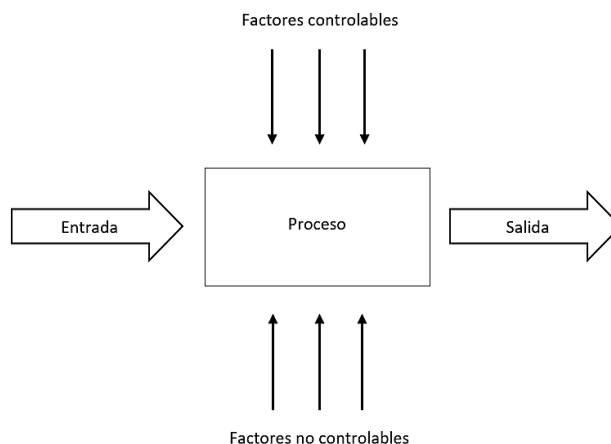
2. MARCO TEÓRICO

A continuación, se desarrollan las referencias teóricas estadísticas y del campo de aplicación del estudio:

2.1. Diseño y análisis de experimentos

Un experimento según Montgomery (2004) es una prueba o una serie de pruebas donde se seleccionan ciertas variables de entrada y se realizan cambios premeditados para determinar el efecto provocado en las variables de salida. Además, por medio de los experimentos se genera el conocimiento empírico más confiable. En un experimento interactúan varios factores controlables y no controlables sobre la variable de entrada y el objetivo es determinar la influencia de estos sobre la variable salida. Con base en la definición del experimento planteado, se logró elaborar el siguiente esquema, presentado en la figura 1.

Figura 7. **Modelo general experimental**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Gutiérrez (2008) menciona que los experimentos son analizados intuitivamente a base de ensayos y errores, pero que esta práctica no garantiza la correcta obtención de las respuestas a las diferentes interrogantes planeadas, por esta razón es el diseño estadístico de experimentos la forma más eficaz de análisis y obtención de respuestas. “Un diseño estadístico experimental consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos, que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder las interrogantes planteadas por el experimentador sobre determinada situación.” (Gutiérrez, 2008, p. 5)

En un proceso intervienen los siguientes elementos, como los detalla Gutiérrez (2008) y como se esquematizó en la figura 1:

- Variable de respuesta: es el resultado de cada prueba del experimento, por medio de esta se puede conocer el efecto que existe en la salida.
- Factores controlables: son variables características que se mantienen fijas en un determinado nivel, es decir que el experimentador puede controlar estas variables.
- Factores no controlables: son variables características que no se pueden fijar o controlar, pero pueden tener un efecto significativo en la variable respuesta.
- Niveles y tratamientos: los niveles son los diferentes valores que se asignan al factor a estudiar. Todos los posibles niveles de un factor se les denomina tratamientos. (p. 5)

Es necesario que en un diseño estadístico experimental el efecto de los factores no controlables sea mínimo para que no exista una incorrecta interpretación del efecto en la variable salida y así lograr un proceso robusto. Para lograr esto Montgomery (2004) expone los siguientes enfoques de planificación:

- Enfoque de la mejor conjetura: se basa en la experiencia, la práctica y los conocimientos científicos del experimentador. Este enfoque se basa en el ensayo y error, además en algunos casos puede llegar a ser tedioso la excesiva cantidad de pruebas que se realizan y el experimentador se conforma con el resultado más cercano, pero no la solución óptima. Este enfoque es cuestionado en múltiples ocasiones por Gutiérrez (2008).
- Enfoque de un solo factor a la vez: se basa en el análisis de la variable salida y su efecto al variar un factor en forma aislada y mantener el resto de los factores que afecten el proceso fijo con valores constantes. La desventaja es que no se ponen en evidencia posibles interacciones entre factores.
- Enfoque factorial: es el enfoque de los diseños experimentales por excelencia, los factores se hacen variar en conjunto con todas las posibles combinaciones y así lograr evaluar la interacción entre factores.

2.1.1. Prueba de hipótesis para datos pareados

Esta prueba se utiliza en los diseños de comparaciones dependientes y los datos obtenidos corresponden a observaciones por pares, los cuales tienen algo en común y tiene como fin, lograr un mejoramiento significativo en la precisión.

Las pruebas de hipótesis a probar para datos pareados son las siguientes:

$$H_o : \mu_d = 0$$

$$H_1 : \mu_d \neq 0$$

Las definiciones matemáticas de la media muestral ($\bar{d}$), la desviación estándar (S_d) y el estadístico de prueba (t_0) de las diferencias de media son las siguientes:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_j \quad (\text{Ec. 01})$$

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (d_j - \bar{d})^2}{n - 1}} \quad (\text{Ec. 02})$$

$$t_0 = \frac{\bar{d}}{\frac{S_d}{\sqrt{n}}} \quad (\text{Ec. 03})$$

2.1.2. Análisis de varianza de un factor

Para un único factor, con una cantidad “ t ” de niveles, “ r ” repeticiones y utilizando la notación de López-Bautista, la esquematización es la siguiente:

Figura 8. Diseño de un análisis de un factor

Tratamientos	Repeticiones					$y_{i\cdot}$
	1	2	3	...	r	
1	y_{11}	y_{12}	y_{13}	...	y_{1r}	$y_{1\cdot}$
2	y_{21}	y_{22}	y_{23}	...	y_{2r}	$y_{2\cdot}$
3	y_{31}	y_{32}	y_{33}	...	y_{3r}	$y_{3\cdot}$
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
t	y_{t1}	y_{t2}	y_{t3}	...	y_{tr}	$y_{t\cdot}$

Fuente: Bautista (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronomía*.

Donde:

$$y_{i\cdot} = \sum_{j=1}^r y_{ij} \quad (\text{Ec. 04})$$

$$\bar{y}_i = \frac{y_{i\cdot}}{r} \quad i = 1, 2, 3, \dots, t$$

(Ec. 05)

Al esquema anterior se le debe de agregar la suma de la última columna conocida como totales ($y_{\cdot\cdot}$) y también se debe encontrar el promedio por nivel y el promedio total de los niveles ($\bar{y}_{\cdot\cdot}$). Utilizando la misma notación de López-Bautista (2008), tenemos las siguientes ecuaciones:

$$y_{\cdot\cdot} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r y_{ij} \quad \bar{y}_{\cdot\cdot} = \frac{y_{\cdot\cdot}}{R} \quad R = t * r \quad (\text{Ec. 06})$$

El análisis de un factor se basa en un modelo de tipo lineal que puede representarse de dos maneras:

- Modelo representado por las medias: utilizado para predecir cada y_{ij} , utilizando la media estimada de cada nivel μ_i , con su respectivo error aleatorio ε_{ij} .

$$y_{ij} = \mu_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (\text{Ec. 07})$$

- Modelo representado de efectos: este modelo utiliza la media global de los datos como la media de cada nivel μ y el efecto del tratamiento τ_i . (p. 16)

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (\text{Ec. 08})$$

Lo que se busca con el análisis de varianza unifactorial es identificar la variación que el factor provoca a través de un posible efecto significativo sobre la variable salida. Las hipótesis que se plantean buscan comprobar que las medias de cada uno de los niveles son iguales o al menos una es distinta. Las hipótesis con enfoque del modelo de medias se presentan de la siguiente manera:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_t$$

$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ por lo menos una media es diferente.}$$

El planteamiento de la hipótesis nula y alternativa con el modelo de los efectos es la siguiente:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_t = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos uno de los niveles.}$$

Ambos planteamientos de hipótesis son equivalentes. Para hacer la respectiva prueba de la hipótesis nula, se debe determinar la variación existente en el experimento. Basado en la secuencia establecida de Walpole y Myers se tiene lo siguiente:

Las fórmulas para analizar el error cuadrático de las mediciones del experimento estarían definidas como:

$$SS_T = \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \dots)^2 \quad (\text{Ec. 09})$$

Del desarrollo de la ecuación anterior, resulta una suma de cuadrados SS_T la cual se compone por la suma de la variación provocada por el tratamiento SS_τ y la variación causada por el error aleatorio SS_ϵ . (p. 177)

$$SS_T = SS_\tau + SS_\epsilon \quad (\text{Ec. 10})$$

La ecuación anterior se puede descomponer de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \cdot \cdot)^2 = r \cdot \sum_{i=1}^t (\bar{y}_i \cdot - \bar{y} \cdot \cdot)^2 + \sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_i \cdot)^2 \quad (\text{Ec. 11})$$

Además, cada componente tiene asociado ciertos grados de libertad. Los grados de libertad asignados al tratamiento se representan con v_τ , los grados de libertad del error aleatorio se representa como v_ϵ y los grados de libertad del fenómeno se representa como v_T . Las fórmulas son las siguientes:

$$v_T = R - 1 \quad v_\tau = t - 1 \quad v_\epsilon = t \cdot (r - 1) \quad (\text{Ec. 12})$$

Al dividir cada una de las sumas de cuadrados con sus respectivos grados de libertad de la ecuación anterior, se obtienen dos varianzas; la del factor y la del error aleatorio, por lo tanto, los cuadrados medios por comparar son los siguientes:

$$MS_\tau = \frac{SS_\tau}{t - 1} \quad MS_\epsilon = \frac{SS_\epsilon}{R - t} \quad (\text{Ec. 13})$$

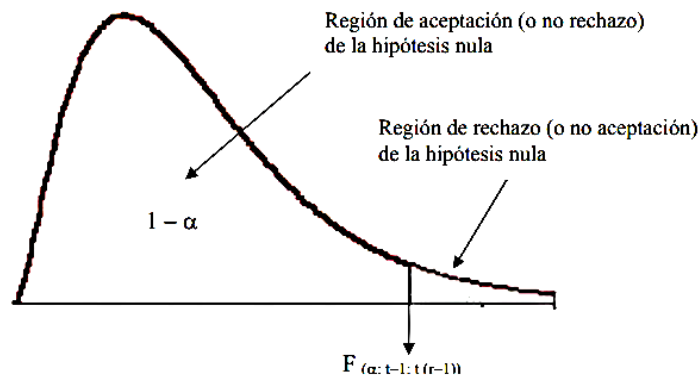
Si la hipótesis nula planteada se cumple, esto indica que la varianza del tratamiento MS_τ es una estimación precisa de la varianza de todos los datos σ^2 , esto será igual para la varianza causada por el error aleatorio. Para poder aceptar

o rechazar las hipótesis planteadas se utilizará la distribución F de Fisher y el siguiente estadístico de prueba:

$$F = \frac{MS_{\tau}}{MS_{\epsilon}} \quad (\text{Ec. 14})$$

El criterio de aceptación o no aceptación de la hipótesis nula es unilateral, según la siguiente figura:

Figura 9. **Criterio de decisión F de Fisher**



Fuente: Bautista (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronomía*.

Si el estadístico de prueba F es mayor al valor crítico $F_{(\alpha; t-1; t(r-1))}$ entonces no se puede aceptar la hipótesis nula de igualdad de medias, lo cual indica que si hay algún efecto en al menos uno de los niveles con una significancia considerable distinta de cero.

Es muy común que los resultados obtenidos de un análisis de varianza se resuman en tablas de análisis que incluyen la suma de cuadrados y los grados

de libertad del factor, del error aleatorio y del total. Este resumen se muestra en la siguiente tabla:

Tabla II. **Resumen análisis de varianza de un factor**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor	$r \cdot \sum_{i=1}^t (\bar{y}_{i \cdot} - \bar{y} \cdot \cdot)^2$	$v_{\tau} = t - 1$	$\frac{SS_{\tau}}{t - 1}$	$\frac{MS_{\tau}}{MS_{\epsilon}}$
Error aleatorio	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y}_{i \cdot})^2$	$v_{\epsilon} = t \cdot (r - 1)$	$\frac{SS_{\epsilon}}{R - t}$	
Total	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (y_{ij} - \bar{y} \cdot \cdot)^2$	$v_T = R - 1$		

Fuente: elaboración propia, Word.

Utilizando la metodología Walpole y Myers, se pueden calcular los intervalos para cada una de las medias con cierto nivel de confianza por medio de la distribución t de Student, esto debido a que la varianza poblacional del experimento permanece desconocida. La fórmula del intervalo de confianza utilizando la notación de López-Bautista es la siguiente:

$$P \left(\bar{y}_{i \cdot} - t_{\left(\frac{\alpha}{2}, R-t\right)} \cdot \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{n}} \leq \mu_i \leq \bar{y}_{i \cdot} + t_{\left(\frac{\alpha}{2}, R-t\right)} \cdot \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{n}} \right) = 1 - \alpha \quad (\text{Ec. 15})$$

Para encontrar el tamaño de muestra recomendado de las repeticiones que se deben hacer en el experimento para cada tratamiento, se usará la siguiente ecuación:

$$n = \frac{2 * (t_{(\frac{\alpha}{2}, t * n_o - t)})^2 * \sigma^2}{d^2} \quad (\text{Ec. 16})$$

Donde n_o es el valor de una propuesta inicial del tamaño de replicas para cada uno de los tratamientos t , el valor de σ^2 es la varianza intrínseca provocado por factores que no se pueden controlar y el valor d^2 es el cuadrado de la diferencia esperada entre las medias de cada uno de los tratamientos.

2.1.3. Supuestos que debe cumplir un análisis de varianza

Para contrastar con precisión las pruebas de hipótesis del análisis de varianza, el modelo planteado debe satisfacer el supuesto de que los residuales tienen una distribución normal e independiente con una media cero y una varianza poblacional constante pero desconocida. Para encontrar los residuales del experimento se le resta a cada observación el estimador del predicho, la ecuación con la notación es la siguiente:

$$e_{ij} = y_{ij} - \bar{y}_i \quad (\text{Ec. 17})$$

A continuación, se describen algunas pruebas para establecer el cumplimiento de los supuestos sobre los residuales y que Montgomery (2004) las describe como las pruebas más comunes en este tipo de ensayos.

2.1.3.1. Prueba de normalidad de *Kolmogorov-Smirnov*

Esta es una prueba muy utilizada en bondad de ajuste, la ventaja que tiene sobre la prueba de ajuste Chi Cuadrado es que no requiere de la agrupación de los datos, la cual puede provocar una pérdida significativa de la información y de su respectiva interpretación.

Esta prueba determina si las puntuaciones en una muestra pueden razonablemente provenir de una población que tiene una distribución teórica. La prueba incluye la especificación de la distribución de frecuencias acumuladas que pudieran ocurrir dada la distribución teórica y la compara con la distribución de frecuencias acumuladas observadas (Siegel, 1990, p. 74)

Para realizar la prueba se deben ordenar los datos y se determina la diferencia entre los valores empíricos $S_n(x)$ respecto de los valores en este caso de la distribución teórica normal $N(x)$. El estadístico de prueba es la diferencia máxima entre ambos valores de las distribuciones:

$$D_n = \max |S_n(x) - N(x)| \quad (\text{Ec. 18})$$

La distribución del estadístico D_n tendrá una región de densidad probabilística con un nivel de significancia α , la cual se encuentra definida como:

$$P\left(D_n > \frac{c}{\sqrt{n}}\right) = \alpha \quad (\text{Ec. 19})$$

Donde el valor de c es un valor numérico cuya función es cuantificar el estadístico de prueba que definirá si la diferencia máxima es significativa o los valores siguen la distribución teórica establecida. Cuando es menor la diferencia al valor crítico $\frac{c}{\sqrt{n}}$ entonces los residuos se pueden considerar normales. La decisión gráfica es la siguiente:

Figura 10. **Zona de aceptación y rechazo *Kolmogorov-Smirnov***



Fuente: elaboración propia, Word.

Si no se cumple la normalidad en los residuos, se debe de modificar el modelo ya sea identificando otras fuentes de variación o replantear el diseño propuesto.

2.1.3.2. **Prueba de normalidad de *Shapiro-Wilks***

Basado en la comparación de potencia de las pruebas de normalidad desarrollada por Muñoz, P., Escobar, L., Sánchez, T. (2019), la prueba de normalidad con mayor potencia y que es independiente al tamaño de la muestra es *Shapiro-Wilks*, además este estudio concluyó que la menos potente es la de *Kolmogorov-Smirnov*. Sin embargo, es recomendable hacer ambas pruebas para

hacer el contraste probabilístico de aceptación de la normalidad en los datos de estudio.

El estadístico de prueba, utilizando la notación se expresa según la siguiente ecuación:

$$W = \frac{1}{(r-1)S^2} \left[\sum_{i=1}^t a_i (X_{(r-i-1)} - X_i) \right]^2 \quad (\text{Ec. 20})$$

Donde $X_{(r-i-1)} - X_i$ son las parejas de datos que corresponden al dato mayor menos el dato menor, a_i son los coeficientes asignados según la posición i y el valor de S^2 es la varianza muestral. Se acepta la normalidad de los datos si el estadístico de prueba W es menor que el valor crítico $W_{1-\alpha}$.

2.1.3.3. Prueba de homocedasticidad de *Bartlett*

Esta prueba busca evaluar si las varianzas de cada nivel del tratamiento son iguales, el cálculo para encontrar el estadístico de prueba se basa en una distribución de muestreo aproximada a la Chi Cuadrado con t *tratamientos* – 1 grados de libertad. El estadístico de la prueba es el siguiente:

$$\chi_0^2 = 2.3026 * \frac{q}{c} \quad (\text{Ec. 21})$$

Donde:

$$q = (R - t) * \log_{10} S_p^2 - \sum_{i=1}^t (r_i - 1) * \log_{10} S_i^2 \quad (\text{Ec. 22})$$

$$c = 1 + \frac{1}{3(t + 1)} \left(\sum_{i=1}^t ((r_i - 1)^{-1} - (R - t)^{-1}) \right) \quad (\text{Ec. 23})$$

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^t (r_i - 1) S_i^2}{R - t} \quad (\text{Ec. 24})$$

La regla de decisión para esta prueba es que se no se debe aceptar la igualdad de varianzas si el estadístico de prueba χ_0^2 es mayor que $\chi_{\alpha, t-1}^2$. Es importante mencionar que la prueba de *Bartlett* es muy sensible al supuesto de la normalidad, por lo tanto, primero se debe hacer la prueba de *Kolmogorov-Smirnov* y al aceptarse la normalidad se debe utilizar esta prueba, de ser necesario se puede utilizar la prueba de Levene.

2.1.3.4. Prueba de independencia de *Durbin-Watson*

Esta prueba “Es la más común para evaluar independencia de los datos del análisis de varianza” (Gutiérrez, 2008, p. 85). Por medio de esta prueba se logra identificar la presencia de correlación entre los residuos, lo cual al aceptarse la correlación se anula el supuesto de independencia. El estadístico de prueba d es el siguiente:

$$d = \frac{\sum_{i=2}^r (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^r (e_i)^2} \quad (\text{Ec. 25})$$

Donde los e_i son los residuos ordenados en el tiempo que se calcularon en la ecuación 17. Se deben encontrar los valores críticos de la prueba, estos valores serán dos cotas: d_L y d_U . Si el valor de d es menor que d_L entonces se rechaza la independencia, si el valor d es mayor que d_U se acepta la independencia de los datos y la prueba es inconclusa si $d_L \leq d \leq d_U$.

2.1.4. Contrastes para medias en experimentos de un factor

Cuando en el análisis de varianza se rechaza la hipótesis de igualdad de medias, entonces se acepta que como mínimo una de las medias de los niveles del factor es diferente. Pero la limitante de este análisis es que no se puede establecer las diferencias entre las medias, por ejemplo, estimar cuales medias son mayores o menores que el resto.

Por esta razón surge la importancia de los contrastes de medias, estos permiten estimar con mayor precisión donde se encuentran las diferencias o las igualdades haciendo uso de comparaciones pareadas.

2.1.4.1. Método de diferencia mínima significativa

Este método es considerado como la mejor opción para hacer las comparaciones respectivas entre los tratamientos, esto se debe a su simpleza y consistencia. Además, debido a que tiende a detectar diferencias pequeñas, se le conoce como la alternativa más potente de todos los contrastes a posteriori. La comparación para tratamientos balanceados es la siguiente:

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > t_{\left(\frac{\alpha}{2}, R-t\right)} \sqrt{\frac{2MS_{\epsilon}}{r}} \quad (\text{Ec. 26})$$

La expresión anterior también se puede reescribir de la siguiente forma:

$$|\bar{y}_i - \bar{y}_j| > LSD \quad (\text{Ec. 27})$$

Donde el valor LSD se calcula según la ecuación 24. Se acepta la desigualdad entre los tratamientos si la diferencia de las medias muestrales en valor absoluto es mayor al valor crítico LSD.

2.1.4.2. Método de Tukey

Este método utiliza una distribución q con f grados de libertad asociados a MS_{ϵ} , esta distribución tiende a generar intervalos más amplios pues se basa en el estadístico del rango estudentizado. El intervalo para tratamientos balanceados y con un $(1-\alpha)$ % de confianza es:

$$P \left[\bar{y}_i - \bar{y}_j - q_{\alpha}(t, f) \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \leq \mu_i - \mu_j \leq \bar{y}_i - \bar{y}_j + q_{\alpha}(t, f) \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \right] = 1 - \alpha \quad (\text{Ec. 28})$$

Si la diferencia estimada entre $\mu_i - \mu_j$ incluye el cero, se concluye que son medias iguales, de lo contrario puede que una sea mayor o menor que la otra media. Debido a que la diferencia crítica $q_{\alpha}(t, f) \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}}$ es constante para todas las comparaciones, a este método se le ha considerado una de las pruebas menos consistentes y la conclusión puede variar de un experimento a otro aun cuando no cambien las diferencias entre los tratamientos.

2.1.4.3. Método de *Duncan*

Es uno de los procedimientos más utilizados en la comparación de medias, a este método también se le conoce como la prueba del rango múltiple. Para tamaños de muestra iguales, primero se debe calcular error estándar según la siguiente fórmula:

$$S_{\bar{y}_i} = \sqrt{\frac{MS_{\epsilon}}{r}} \quad (\text{Ec. 29})$$

Para utilizar este método se tienen una distribución de rangos r , nuevamente tiene f grados de libertad que provienen del error del análisis de varianza. Los rangos mínimos de comparación R_p se calcularán de la siguiente manera:

$$R_p = r_{\alpha}(p, f) S_{\bar{y}_i} \quad (\text{Ec. 30})$$

Estos valores se comparan ordenando de manera ascendente las medias de los tratamientos y considerando al valor p como el subconjunto de medias entre el tratamiento 1 al tratamiento t . Se calculan las diferencias entre todas las medias respetando el orden ascendente, si la diferencia es mayor al rango mínimo de comparación se concluye que las dos medias contrastadas es significativamente diferente.

Esta prueba tiene una consistencia moderada por lo cual es muy adecuada en las comparaciones entre tratamientos, la única limitante es que no debe utilizarse si se tienen varianzas heterogéneas.

2.1.4.4. Método de Hsu

Basado en la explicación expuesta anteriormente, por medio de este método se realizan comparaciones con el nivel que presente la mejor media pero que es desconocido contra el resto de las medias que pertenecen a los niveles del tratamiento a contrastar. Con este método y con el respectivo nivel de confianza, se logra estimar si el nivel del tratamiento con media muestral $\bar{y}_i$ difiere significativamente con el nivel con la media más grande $\max\{\bar{y}_j\}$, donde la j debe ser distinta a la media de i .

La diferencia poblacional $\mu_i - \max\{\mu_j\}$ se estima por medio de la distribución D , establecida en la metodología de comparación de control de *Dunnett*. Asociado nuevamente a los grados de libertad del error y bajo la condición de que sigue una distribución t multivariada con correlaciones iguales a $1/2$, se obtiene el siguiente intervalo de confianza:

$$P \left[\min \left\{ \left(\bar{y}_i - \mu_i - \max\{\mu_j\}_{i \neq j} \right) - D_{(t, v_{\epsilon}, \frac{1}{2})} \cdot \sqrt{\frac{2MS_{\epsilon}}{r_i}}, 0 \right\} \leq \mu_i - \max\{\mu_j\} \right. \\ \left. \leq \max \left\{ \left(\bar{y}_i - \mu_i - \max\{\mu_j\}_{i \neq j} \right) + D_{(t, v_{\epsilon}, \frac{1}{2})} \cdot \sqrt{\frac{2MS_{\epsilon}}{r_i}}, 0 \right\} \right] = 1 - \alpha \quad (\text{Ec. 31})$$

Si el intervalo de confianza contiene el cero entonces no hay diferencia entre las medias. El contraste para comparar es el valor más bajo es mejor, por lo tanto, todo el intervalo de confianza debe ser menor a cero.

2.1.5. Diseño en bloques completos al azar

Un diseño de bloque, basado en la definición de Gutiérrez (2008) es:

Un análisis de varianza al cual se le agregan variables adicionales al factor de interés, con el fin de mejorar la precisión en la comparación de los tratamientos. Los factores de bloque tienen una importancia secundaria y deben de agregarse únicamente aquellos que por conocimiento o experiencias previas pueden afectar considerablemente el valor de la respuesta. (p. 52)

El modelo estadístico es el siguiente:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (\text{Ec. 32})$$

Donde y_{ij} es la medición correspondiente al tratamiento i y al bloque j , τ_i es el efecto del tratamiento, γ_j es el efecto del bloque y b es el número de bloques. Las hipótesis se presentan de la siguiente manera:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = \mu_t$$
$$H_1: \mu_i \neq \mu_j \text{ por lo menos una media es diferente.}$$

El planteamiento de la hipótesis nula y alternativa con el modelo de los efectos se puede expresar como:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_t = 0$$
$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos uno de los niveles}$$

La tabla resumen del análisis de varianza para los diseños en bloques se muestra a continuación:

Tabla III. **Resumen análisis de varianza diseño en bloques**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Tratamientos	SS_A	$t - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{t - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_\epsilon}$
Bloques	SS_B	$b - 1$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	
Error	SS_ϵ	$(t - 1)(b - 1)$	$MS_\epsilon = \frac{SS_\epsilon}{(t - 1)(b - 1)}$	
Total	SS_T	$tb - 1$		

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

La hipótesis nula de igualdad de las medias no se aceptará si el F calculado es mayor al valor crítico $F_{\alpha, t-1, (t-1)(b-1)}$. Para evaluar si el bloqueo fue significativo, se debe comparar la razón $\frac{MS_B}{MS_\epsilon}$ con el F crítico de la prueba, las pruebas de hipótesis a probar para el efecto del bloque son las siguientes:

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_b = 0$$

$$H_1: \gamma_j \neq 0 \text{ para al menos uno de los bloques.}$$

Si no se acepta la hipótesis nula, entonces el bloqueo tiene influencia en la variable respuesta y debe tomarse en cuenta para mejorar la calidad del contraste. La diferencia de un bloqueo con un diseño bifactorial basada en la conclusión es que “En un bloqueo no existe el efecto de interacción. Esto se debe a que las corridas de un bloqueo no se aleatorizan, al contrario, en la práctica es común que se hagan de manera consecutiva”. (Gutiérrez, 2008, p. 94)

2.1.6. Diseños factoriales

Los diseños factoriales basados en la definición de Montgomery (2004) son:

Los más eficientes cuando en el estudio intervienen dos o más factores. En un diseño factorial se investigan todas las posibles combinaciones entre los posibles niveles de cada factor. Un diseño de dos factores está definido de la siguiente forma, donde t representa los niveles del primer factor, b representa los niveles del segundo factor (p. 84):

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \gamma_j + (\tau \cdot \gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (\text{Ec. 33})$$

Además μ es la media total, τ_i es el efecto del primer factor, γ_j es el efecto del segundo factor y ε_{ijk} es el error aleatorio asignada a cada una de las observaciones. Las hipótesis de este tipo de diseño factorial buscan determinar bajo el enfoque de los efectos, si existe algún efecto entre niveles de cada factor o es no significativo.

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_t = 0$$

$$H_1: \tau_i \neq 0 \text{ para al menos uno de los niveles.}$$

$$H_0: \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \gamma_b = 0$$

$$H_1: \gamma_j \neq 0 \text{ para al menos uno de los niveles.}$$

La importancia de los diseños factoriales surge debido a que también se plantea una hipótesis para determinar si los factores interactúan significativamente, el planteamiento es el siguiente:

$$H_0: (\tau \cdot \gamma)_{ij} = 0$$

$H_1: (\tau \cdot \gamma)_{ij} \neq 0$ para al menos una de las combinaciones.

2.1.7. Análisis de varianza para dos factores

Para encontrar el efecto total SS_T en el cual interactúa el efecto de A (SS_A), el efecto de B (SS_B) y el efecto de interacción AB (SS_{AB}) se tiene la siguiente expresión:

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_\epsilon \quad (\text{Ec. 34})$$

La tabla resumen del análisis de varianza para bifactorial con efectos fijos y con los contrastes de significancia se muestra a continuación:

Tabla IV. Resumen análisis de varianza de dos factores

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Factor A	SS_A	$t - 1$	$MS_A = \frac{SS_A}{t - 1}$	$\frac{MS_A}{MS_\epsilon}$
Factor B	SS_B	$(b - 1)$	$MS_B = \frac{SS_B}{b - 1}$	$\frac{MS_B}{MS_\epsilon}$
Interacción	SS_{AB}	$(t - 1)(b - 1)$	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(t - 1)(b - 1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_\epsilon}$
Error	SS_ϵ	$tb(r - 1)$	$MS_\epsilon = \frac{SS_\epsilon}{tb(r - 1)}$	
Total	SS_T	$tbr - 1$		

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Si el estadístico de prueba F es mayor al valor crítico $F_{(\alpha, \text{grados de libertad})}$ entonces la hipótesis nula debe de rechazarse, lo cual indica que si existe algún

efecto entre los niveles del tratamiento o entre la interacción de los tratamientos del estudio.

2.1.8. Covariables

Una covariable es aquella variable que no puede ser controlada por el experimentador, pero puede tener un efecto significativo en la variable respuesta, por medio de las covariables se puede lograr un análisis de varianza más preciso.

Se presenta el efecto de la covariable como el siguiente modelo:

$$y_{ij} = \beta_0 + \tau_i + \beta_1 \cdot \bar{x}_{ij} + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (\text{Ec. 35})$$

De manera demostrativa y sustituyendo al estimador que está expresado por $\mu = \beta_0 + \beta_1 \bar{x} \dots$, se obtiene la forma más común del modelo con covariables:

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_1 (\bar{x}_{ij} - \bar{x} \dots) + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, t \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (\text{Ec. 36})$$

El efecto de la covariable puede ser evaluado por medio de una prueba de significancia, para establecer si el efecto debe permanecer en el análisis o puede ser despreciable. Para estimar el valor de β_1 el cual representa el efecto de la covariable se utiliza la siguiente fórmula de regresión lineal:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r [(x_{ij} - \bar{x}_{i.})(y_{ij} - \bar{y}_{i.})]}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (\text{Ec. 37})$$

La tabla para aceptar o rechazar la significancia del efecto de la covariable se detalla a continuación basado en la metodología establecida:

Tabla V. **Resumen análisis de covarianza**

Fuente de la variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F
Regresión	$\frac{S_{xy}^2}{S_{xx}}$	1	-	$\frac{SS_{\epsilon}' - SS_{\epsilon}}{t - 1}$ MS_{ϵ}
Tratamientos	$SS_{\epsilon}' - SS_{\epsilon}$	$t - 1$	$\frac{SS_{\epsilon}' - SS_{\epsilon}}{t - 1}$	
Error	$SS_{\epsilon} = E_{yy} - \frac{E_{xy}^2}{E_{xx}}$	$t(r - 1) - 1$	$MS_{\epsilon} = \frac{SS_{\epsilon}}{t(r - 1) - 1}$	
Total	S_{yy}	$tr - 1$		

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Si el estadístico de prueba F es mayor al valor crítico $F_{(\alpha, \text{grados de libertad})}$ entonces la hipótesis nula no se puede aceptar y el efecto de la covariable es distinto de cero y por lo tanto es significativo. De la tabla anterior el valor de SS_{ϵ}' se obtiene como:

$$SS_{\epsilon}' = \frac{S_{yy} - S_{xy}^2}{S_{xx}} \quad (\text{Ec. 38})$$

2.2. El ruido

Para poder definir el ruido, primero se debe definir que es el sonido. El sonido no es más que la sensación de un conjunto de vibraciones que se propagan en un medio elástico y que es percibido por el oído. El ruido según Naf-Cortés (2013) “Es un sonido cuyas vibraciones son nocivas para la salud,

provocando pérdida auditiva o interferencias en la realización de tareas cotidianas” (p. 8).

2.2.1. Tipos de ruido

Los tipos de ruido más comunes en la industria según Torres (2018) son los siguientes:

- Ruido continuo: es producido debido a equipo o maquinaria cuya operación es ininterrumpida, es común en la industria que este tipo de ruido se refleje en los equipos de bombeo o ventiladores. La medición de este ruido es la más fácil debido a que basta con realizar lecturas en un periodo de tiempo corto para tener el estimado promedio del ruido emitido por la fuente.
- Ruido intermitente: es aquel cuyas vibraciones de alta y baja frecuencia se presentan en ciertos ciclos, es común que en las maquinarias de procesos de producción se evidencien ruidos intermitentes. Es común definir este ruido como un suceso acústico, pues se presenta cada cierto tiempo. La medición de este tipo de ruido puede hacerse como si fuera un ruido continuo, pero debe de especificarse el periodo de tiempo del ciclo.
- Ruido impulsivo: es un ruido breve pero sus niveles son altos, causa una mayor molestia a pesar de ser instantáneo. Su medición se complica por lo que se acostumbra a cuantificar el impulso del ruido, siendo la diferencia entre el evento de respuesta rápida menos el mismo evento en respuesta lenta.

- Ruido ambiente: es aquel donde se encuentran los niveles mínimos de ruido y que no existe alguna perturbación externa como fuente agregada de ruido. (p. 67)

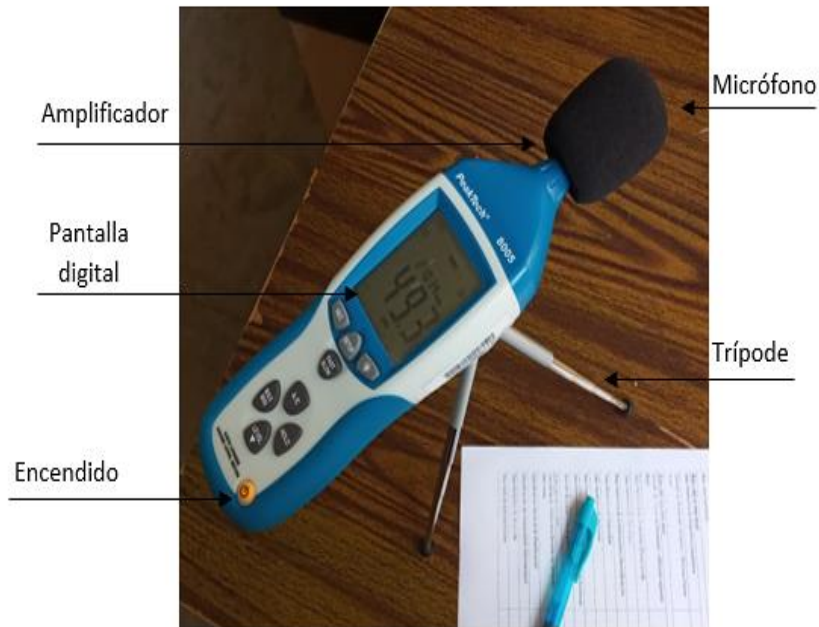
2.2.2. Medición del ruido

La magnitud del ruido se cuantifica por medio de la unidad de medida denominada decibeles y que se abrevia como dB. El equipo más utilizado para la medición del ruido es el decibelímetro o también conocido como sonómetro. Las partes de este equipo se detallan a continuación en base a la descripción de Torres (2018):

- Micrófono: en unión con un amplificador interno, logra cuantificar la frecuencia del sonido e identifica la magnitud en decibeles.
- Circuito: componentes internos que procesan electrónicamente la señal sonora.
- Entre otras partes se encuentra la pantalla digital, diferentes interruptores integrados y conectores de salida para compartir la información obtenida. (p. 75)

El decibelímetro se muestra a continuación, en la imagen puede apreciarse el micrófono con amplificador digital, un trípode y la pantalla digital que muestra el valor de la magnitud del ruido ambiente, cuyas unidades son los decibeles.

Figura 11. **Decibelímetro**



Fuente: elaboración propia, Cimera.

2.2.3. **Legislación internacional y nacional sobre el ruido**

Existen diferentes normas a nivel internacional que buscan establecer el tiempo máximo de exposición a ciertos niveles de ruido, a continuación, se mencionan algunas normas:

- Norma ISO (*International Organization for Standardization*) 28803:2012. Ergonomía del ambiente físico: esta norma tiene como objetivo la aplicación de un ambiente ergonómico en beneficio del personal con necesidades especiales, su importancia radica en que establece ciertos parámetros para un ambiente ergonómicamente acústico.

- Norma ISO 9612:2009. Acústica: esta norma determina los diferentes niveles de exposición al ruido en los lugares de trabajo por medio de los diferentes métodos de la ingeniería.
- Norma ISO 11690:1997. Acústica: esta norma desarrolla prácticas recomendadas para el diseño de lugares de trabajo que contiene maquinaria.

En general Niebel establece la siguiente ecuación para cuantificar el tiempo máximo de exposición a un cierto nivel de ruido:

$$\Delta t = \frac{8}{2^{\frac{L-90}{5}}} \quad (\text{Ec. 39})$$

En la ecuación anterior L representa el nivel de exposición al ruido en decibeles(dB) y Δt el tiempo máximo de exposición en horas, esta cumple con los parámetros debidamente establecidos por la OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*). También se debe calcular la dosificación del ruido (D), esta se calcula de la siguiente manera:

$$D = 100 * \left(\frac{C1}{T1} + \frac{C2}{T2} + \frac{CN}{TN} \right) \quad (\text{Ec. 40})$$

Donde $C1, C2, CN$ representa la exposición de ruido real y $T1, T2, TN$ representa el tiempo teórico máximo de exposición. Si el valor de la dosificación es mayor o igual a uno, entonces es necesario el uso de equipo de protección, de lo contrario no es necesario, pero es importante evaluar si puede llegar a ser requerido.

Dentro del territorio nacional es el Acuerdo Gubernativo 229-2014 emitido por el Presidente de la República de Guatemala, es quien se encarga de establecer los parámetros adecuados del ruido, velando por la integridad y salud del trabajador.

En el artículo 182 se menciona:

Que todos los centros de trabajo ruidosos son aquellos que tienen una fuente sonora que produce un ruido continuo mayor a los 85 decibeles o los ruidos de impacto de 90 decibeles. (p. 22)

El artículo 185 del mismo cuerpo normativo establece que:

Si alguna fuente sonora sobrepasa los niveles y el tiempo de exposición establecidos, esta fuente debe ser instalada de tal manera que elimine o reduzca el ruido percibido por los trabajadores, así como su propagación al medio interno y externo del centro de trabajo. (p. 24)

Los parámetros reglamentados son los siguientes:

Tabla VI. **Nivel y tiempo máximo de exposición**

Niveles de Presión Sonora dB	Tiempo de exposición por jornada
85	8 horas
88	4 horas
91	2 horas
94	1 hora
97	30 minutos
100	15 minutos

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Además, regula en su artículo 192 que:

Todo centro de trabajo clasificado como ruidoso tiene que implementar un programa conservación auditiva a largo plazo para velar por la salud y seguridad ocupacional. Este programa debe de garantizar eficacia en las medidas tomadas, promover medidas de prevención, minimizar la exposición al ruido y llevar un registro de los niveles de ruido a los trabajadores son expuestos y son causados por el ambiente interno y externo. (p. 28)

2.2.4. Prácticas en el control de ruido en la industria

Para la mitigación del ruido actualmente se utilizan diferentes prácticas eficientes. En el artículo 186 del Acuerdo Gubernativo 229-2014 de Guatemala, se especifica que:

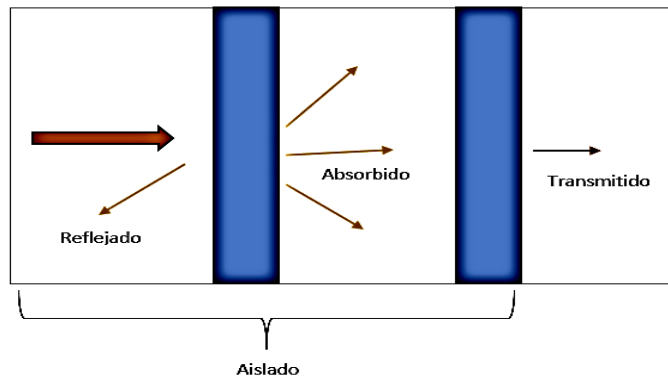
“Toda fuente generadora de ruido en los centros de trabajo necesita ser aislada o separada para atenuar su propagación y posibles efectos dañinos en la salud de todos los trabajadores que se desempeñan en el lugar de trabajo” (p. 25).

En general en cualquier práctica de mitigación acústica se presentarán los siguientes efectos, ver figura 6:

- Ruido reflejado: es una porción de energía acústica que regresa como una respuesta hacia la fuente sonora.

- Ruido absorbido: es una porción de la energía acústica que es absorbido por el material empleado en la mitigación del ruido. Los materiales con mayor porosidad son aquellos que tienen una mayor tasa de absorción.
- Ruido transmitido: es una porción de la energía acústica que no fue posible aislar. Se busca que los niveles de transmisión sean los menores, para lograrlo se necesita que los niveles del ruido reflejado y absorbido sean superiores.

Figura 12. **Comportamiento del ruido**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Utilizando la subdivisión que realizó Torres (2018) en su libro, se tienen las siguientes prácticas más comunes en el aislamiento del ruido:

2.2.4.1. Sistemas masa-muelle-masa

Estos sistemas son definidos por Naf-Cortés (2013) como:

Aquellos que buscan aislar de manera eficiente el ruido, está compuesto por las dos masas que son de un material de alta densidad y entre ambas masas se coloca el muelle, el cual debe ser un material de baja densidad

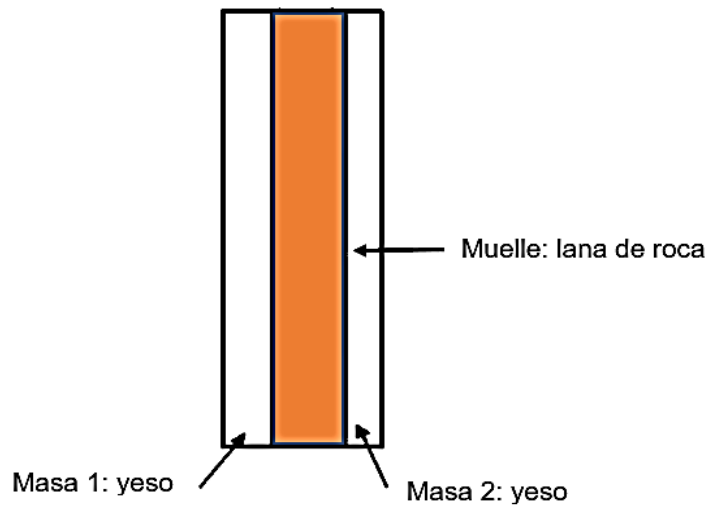
que frene las ondas de la fuente sonora. El fin de estos sistemas es filtrar la onda, para que el ruido transmitido sea del nivel más bajo posible. (p. 14)

Es común que los materiales que se utilicen como masa sean las placas de yeso o cualquier estructura de alta densidad según indica Torres (2018). La clasificación de los materiales más comunes empleados como muelle son los siguientes:

- Fibras: estos materiales son los más utilizados debido a su alta porosidad y su absorción eficiente. Algunas de las fibras más utilizadas son la lana de roca y la fibra de vidrio.
- Espumas: estos materiales también son utilizados por su adecuada absorción, pero tiene como desventaja sus altos costos. Algunas de las espumas más utilizadas son el poliuretano y el poliestireno.
- Textiles: su uso es limitado debido a que son altamente combustibles, sin embargo, uno de los materiales más utilizados como textil es el algodón.

La estructura convencional de un sistema masa-muelle-masa utilizando un material fibroso es la siguiente:

Figura 13. **Estructura sistema masa-muelle-masa**



Fuente: elaboración propia, empleando Word.

2.2.4.2. Espuma acústica

Este material basado en la descripción que realiza Torres (2018), debe ser un material flexible de poro abierto que aísla significativamente fuentes ruidosas, esta espuma se puede utilizar colocándola al interior de la fuente ruidosa logrando incluso mitigar vibraciones transmitidas. Otro uso que se le puede dar a la espuma es aplicándola en tablas de respaldo por medio de algún adhesivo, estas tablas se deben usar haciendo un cubículo que encierre la maquinaria o la fuente sonora. El autor resalta que al manipular este tipo de material mineral se debe de tener demasiado cuidado pues produce alergias cutáneas.

2.2.4.3. Paneles acústicos

Este método Torres (2018) lo define como la alternativa óptima cuando aislar a la fuente sonora no es posible debido a las condiciones del proceso o del entorno. El objetivo es colgar sobre la fuente estos paneles formados internamente por materiales absorbentes. El material interno más común utilizado en estos paneles es la fibra de vidrio recubierta por duroport, además las dimensiones de cada panel dependerán de la cantidad de ondas que se buscan absorber y también estará en función de la altura y de las condiciones de trabajo.

2.2.5. Enfermedades ocupacionales provocadas por la exposición al ruido

Las enfermedades ocupacionales y lesiones ocasionadas por el ruido en la industria según Naf-Cortés (2013) son las siguientes:

- **Fatiga auditiva:** es una alteración transitoria de la capacidad auditiva provocada por una exposición leve a una fuente ruidosa. No hay lesión y se puede recuperar la capacidad auditiva con el descanso sonoro. El tiempo necesario del descanso dependerá de la intensidad, la duración de la exposición y las recomendaciones médicas.
- **Hipoacusia:** se encuentra catalogada como la enfermedad ocupacional provocada tras una exposición a una intensidad sonora elevada, en cualquier periodo de tiempo. Al inicio, la pérdida de audición no afecta a nivel conversacional, es decir que las frecuencias afectadas se encuentran entre los 4,000 y 6,000 Hz. (p. 26)

El autor resalta que la exposición continuada a ruidos con alta intensidad es la causa principal de la hipoacusia en los trabajadores y como se mencionó con anterioridad, esta se encuentra catalogada como enfermedad profesional. Pero en el caso en que el trabajador sufra de una fatiga auditiva, también denominado trauma acústico sonoro se le considerará como un accidente de trabajo.

3. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos según los objetivos propuestos del diseño experimental.

Objetivo 1. Comparar niveles del espesor mediante un análisis de varianza para inferir si existe un efecto en la tasa media de transmisión de cada material.

3.1. Efecto de la cámara acústica

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la prueba *t* *Student* para datos pareados cuyo fin fue determinar las dimensiones adecuadas de la cámara acústica, las cuales no tendrían un efecto de reducción significativa en la medición de la tasa acústica de transmisión. La prueba fue:

$$H_o : \mu_d = 0$$

$$H_1 : \mu_d \neq 0$$

Fuente: elaboración propia.

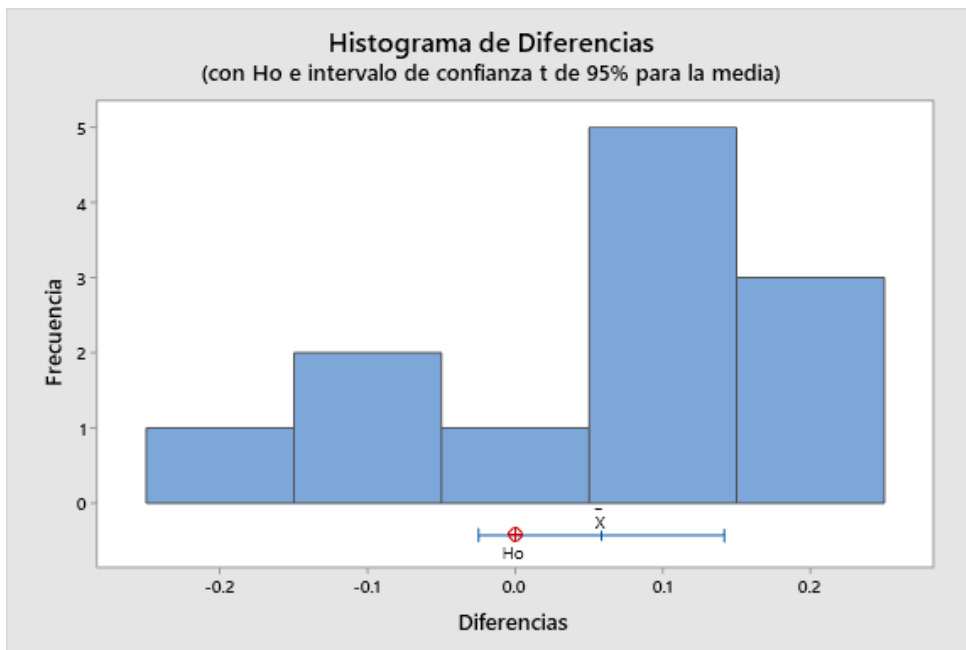
La hipótesis nula se aceptó, es decir que el efecto de la cámara acústica es no significativo, esto se puede apreciar en la siguiente tabla de resultados y en el histograma de diferencias de media:

Tabla VII. **Resultados prueba pareada**

Nivel de confianza	95%
Intervalo de confianza para la diferencia de medias	(-0.0250;0.1417)
Valor P	0.152
Debido a $P > 0.05$, no se rechaza H_0 .	

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Figura 14. **Histograma de diferencias para datos pareados**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Del gráfico anterior se puede apreciar visualmente como la hipótesis nula cae dentro del intervalo de igualdad de medias para datos pareados, por lo tanto, se estableció que las dimensiones de la cámara acústica tenían que ser de 30 centímetros de ancho, por 30 centímetros de largo y 30 centímetros de alto.

3.2. Diseño experimental de la fibra, espuma y textil

En este apartado se detallan los resultados del diseño experimental el cual comparó los tres tipos de materiales; donde la fibra fue representada por la lana de roca, la espuma fue representada por el poliestireno y el textil por el algodón.

3.2.1. Comprobación de supuestos del análisis de varianza

El primer supuesto que se verificó fue si los residuos tenían un comportamiento normal, para esto se utilizó la prueba de *Kolmogorov Smirnov*, la de *Shapiro Wilks* y el método gráfico de QQ Plot. Los resultados obtenidos de los datos sin transformar se resumen en la siguiente tabla:

Tabla VIII. Pruebas de normalidad datos sin transformar

Prueba	P valor	Criterio
<i>Kolmogorov Smirnov</i>	< 0.0001	Usando un alfa de 0.05, se rechaza la normalidad.
<i>Shapiro Wilks</i>	< 0.0001	Usando un alfa de 0.05, se rechaza la normalidad.

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

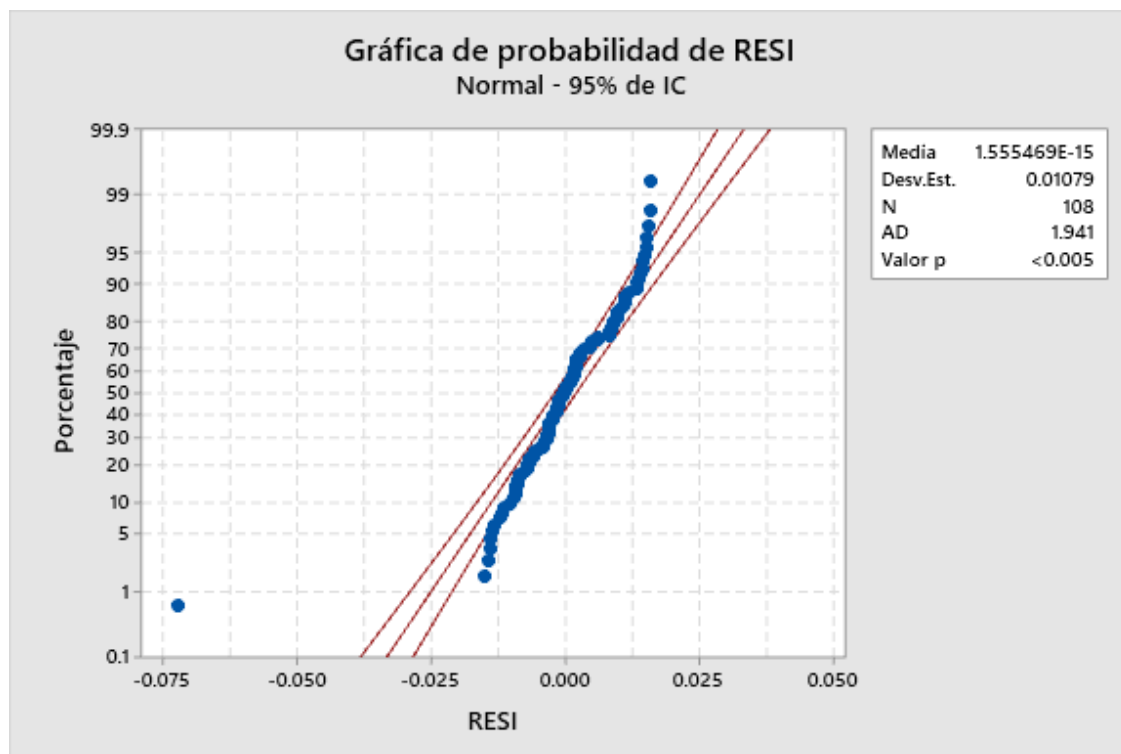
Las dos pruebas estadísticas rechazaron la normalidad, esto se confirmó con el gráfico de QQ Plot presentado en la figura 9 y por lo tanto fue necesario realizar una transformación de los datos. La función elegida para transformar los residuos (RES) y lograr cumplir el supuesto de normalidad fue el inverso de la raíz cuadrada de los residuales:

$$RES\ Transformado = \frac{1}{\sqrt{RES}}$$

Fuente: elaboración propia.

Los nuevos resultados obtenidos para la prueba de *Kolmogorov Smirnov* y la de *Shapiro Wilks* se muestran en la tabla a continuación, en esta tabla se puede apreciar una mejora significativa en el P valor y por lo tanto en la aceptación de la normalidad de los residuos.

Figura 15. **QQ Plot datos sin transformar**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

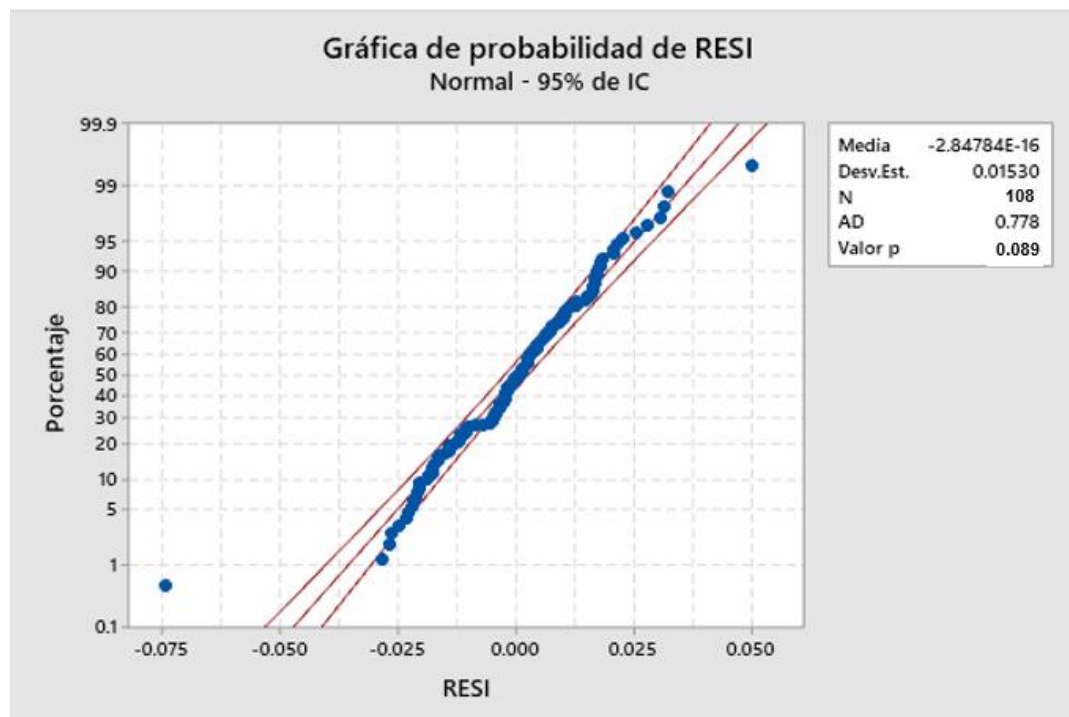
Tabla IX. **Pruebas de normalidad datos transformados**

Prueba	P valor	Criterio
<i>Kolmogorov Smirnov</i>	0.087	Usando un alfa de 0.05, se acepta la normalidad.
<i>Shapiro Wilks</i>	0.1282	Usando un alfa de 0.05, se acepta la normalidad.

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

En el gráfico QQ Plot se puede apreciar la mejoría de la normalidad al ser transformados los residuos por el inverso de la raíz de estos:

Figura 16. **QQ Plot datos transformados**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Debido a que el valor P de las dos pruebas de normalidad es mayor que 0.05 entonces se aceptó el supuesto de normalidad para los datos transformados, se debe de prestar atención en el gráfico QQ Plot donde hay dos datos atípicos. Debido a que estos datos fueron medidos bajo condiciones normales y no hay causas atribuibles que puedan requerir que estos valores sean rechazados, se conservarán.

El siguiente supuesto que se verificó es el de varianza constante por medio de la prueba de homocedasticidad de *Bartlett*. Primero se determinó la normalidad debido a que esta prueba es altamente sensible a la normalidad de los datos, los resultados obtenidos para los datos transformados son los siguientes:

Tabla X. **Prueba de homocedasticidad**

Prueba	P valor	Criterio
<i>Bartlett</i>	0.0890	Usando un alfa de 0.05 se acepta la homocedasticidad.

Fuente: elaboración propia.

Con la prueba de *Bartlett* se concluyó que los datos son homocedásticos y esto tiene coherencia debido a que al transformar una variable de tal manera que se distribuya normalmente se realiza una mejoría en la homocedasticidad de la varianza. Finalmente, el último supuesto que se verificó fue el de independencia, este supuesto se analizó por medio de la prueba de *Durbin Watson*, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XI. Prueba de independencia

Prueba	Valor D	D _L crítico inferior	D _U crítico superior	Criterio
<i>Durbin Watson</i>	0.6595	1.7007	1.7566	Si (4-D) es mayor que D _L entonces son independientes. 3.3405 > 1.7007, por lo tanto, hay independencia.

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

De la prueba de *Durbin Watson* se concluyó que los datos si son independientes, ya que cumplió con el criterio establecido por la prueba. Se comprobaron y aceptaron los tres supuestos de todo modelo: normalidad, homocedasticidad e independencia. Lo que prosiguió fue realizar los análisis de varianza correspondientes para los factores que fueron considerados.

3.2.2. Análisis de varianza de dos factores, dos bloqueos y una covariable

Para el análisis de varianza se consideraron 2 factores principales:

- Factor tipo de material: este factor tenía tres niveles, el primer nivel fue el material de fibra denominado lana de roca, el segundo nivel fue el material de espuma denominado poliestireno y finalmente el tercer nivel fue el material textil cuyo nombre es algodón. Se identificaron con los números 1, 0 y -1 respectivamente.
- Factor espesor: este factor tenía tres diferentes niveles de espesor: 50, 75 y 100 milímetros. Estos valores fueron seleccionados tomando de

referencia la Norma UNE-EN 13162:2002. Estos se identificaron con los números -1, 0 y 1 respectivamente.

También se incluyó la medición de la covariable temperatura en grados centígrados, esta se tomó en cuenta para identificar si tiene un efecto significativo sobre la mitigación del ruido en los materiales. Además, se agregaron dos bloqueos para determinar si tenían una influencia en la medición; el primer bloqueo fue la distancia del radio de medición en centímetros y el ángulo en grados.

Al diseño experimental mencionado con anterioridad, al tener dos factores con los mismos niveles, también se le conoce como diseño factorial 3^2 con análisis de covarianza y dos bloqueos. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XII. **Diseño factorial 3^2 con covariable y dos bloqueos**

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	F	P valor
Material	0.03280	2	0.0164	335.3796	<0.0001
Espesor	0.00856	2	0.0042	87.6116	<0.0001
Ángulo	0.00020	3	0.0001	1.3883	0.2513
Distancia radial	0.00053	2	0.0002	5.4467	0.0058
Material*Espesor	0.00790	4	0.0019	40.4310	<0.0001
Temperatura	0.00048	1	0.0004	9.8435	0.0023
Error	0.00454	93	0.0005		
Total	0.25781	107			

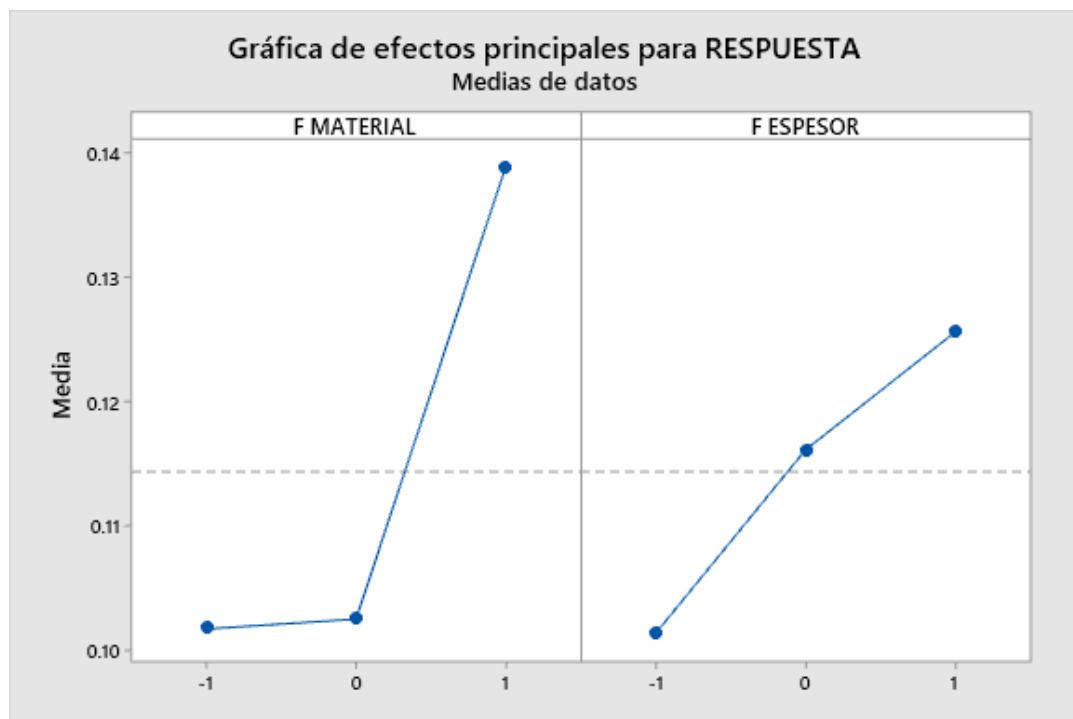
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Se debe hacer énfasis en que el ángulo y la distancia radial son factores de bloqueo y la temperatura es una covariable, además del software se obtuvo un

coeficiente para dicha covariable de -0.0391 y fue significativa. Se pudo apreciar que el bloqueo de ángulo no fue significativo a un nivel de significancia del 5 %.

A continuación, se muestra el gráfico de efectos principales para los espesores y para los tipos de material, este procedimiento se realizó para identificar algún efecto de curvatura que puede afectar el ajuste del análisis de varianza en aquellas variables que son cuantitativas. Se puede apreciar que el gráfico concuerda con el ANOVA y los efectos principales son significativos:

Figura 17. **Gráfico de efectos principales ANOVA 1**

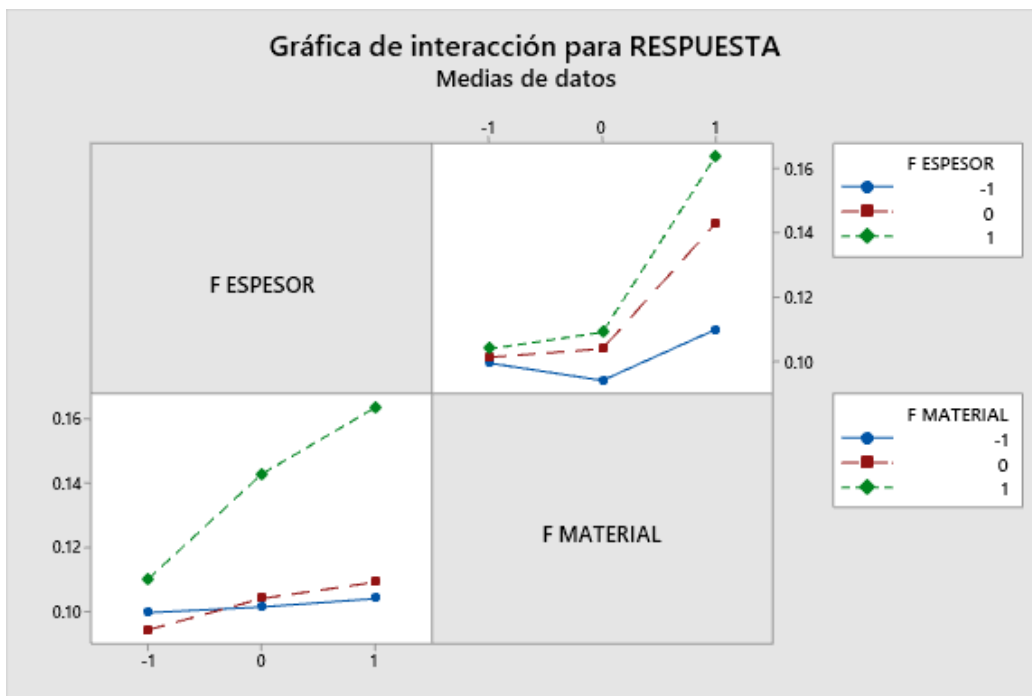


Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

También se puede verificar la interacción entre los dos factores principales por medio del gráfico de interacciones. En el siguiente gráfico de interacciones

se puede notar que al no ser líneas paralelas entonces hay una interacción significativa y esto concuerda con los resultados obtenidos del análisis de varianza.

Figura 18. **Gráfico de interacción del ANOVA 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Se realizó la prueba de falta de ajuste en el *software InfoStat*, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XIII. **Prueba de falta de ajuste**

Prueba de falta de ajuste	Estadístico Fisher	Valor P	Criterio
	0.3800	0.5400	Al ser P mayor a 0.05, no hay falta de ajuste

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Objetivo 2. Contrastar las diferencias en las tasas medias de transmisión de la lana de roca, el poliestireno y el algodón mediante un análisis de varianza y pruebas post hoc para identificar cual es el mejor.

3.2.3. Contraste LSD, Tukey y Duncan para los tipos de materiales

Se realizaron 3 comparaciones para identificar diferencias entre los tipos de materiales, el espesor y la interacción de ambos factores. Los resultados para la prueba de diferencia de medias LSD en los tres casos se muestra a continuación:

Tabla XIV. **Prueba LSD para el espesor**

Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1 (50)	0.1021	36	0.0012	A B C
0 (75)	0.1161	36	0.0011	
1 (100)	0.1244	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XV. **Prueba LSD para el material**

Material	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1	0.1015	36	0.0012	A A B
0	0.1026	36	0.0012	
1	0.1391	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XVI. **Prueba LSD para interacción material*espesor**

Material	Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
0	-1	0.0941	12	0.0020	A B B B B
-1	0	0.1009	12	0.0020	
-1	-1	0.1010	12	0.0021	
-1	1	0.1025	12	0.0021	
0	0	0.1038	12	0.0020	
0	1	0.1099	12	0.0020	C C D E
1	-1	0.1114	12	0.0021	
1	0	0.1436	12	0.0020	
1	1	0.1621	12	0.0021	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Para el tipo de material se debe de recordar que el nivel -1 hace referencia al algodón, el nivel 0 hace referencia al poliestireno y el nivel 1 hace referencia a la lana de roca. A continuación, se presentan los resultados para la prueba de *Tukey*:

Tabla XVII. **Prueba *Tukey* para el espesor**

Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1 (50)	0.1022	36	0.0012	A B C
0 (75)	0.1161	36	0.0012	
1 (100)	0.1248	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XVIII. **Prueba *Tukey* para el material**

Material	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1	0.1015	36	0.0012	A A B
0	0.1026	36	0.0012	
1	0.1390	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XIX. **Prueba *Tukey* para interacción material*espesor**

Material	Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
0	-1	0.0940	12	0.0020	A AB AB AB C B C C C D E
-1	0	0.1008	12	0.0020	
-1	-1	0.1010	12	0.0021	
-1	1	0.1025	12	0.0021	
0	0	0.1038	12	0.0020	
0	1	0.1099	12	0.0020	
1	-1	0.1114	12	0.0021	
1	0	0.1436	12	0.0020	
1	1	0.1621	12	0.0021	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Finalmente se presentan los resultados para la prueba de *Duncan*:

Tabla XX. **Prueba *Duncan* para el espesor**

Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1 (50)	0.1022	36	0.0012	A B C
0 (75)	0.1161	36	0.0012	
1 (100)	0.1248	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XXI. **Prueba *Duncan* para el material**

Material	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
-1	0.1015	36	0.0012	A A B
0	0.1026	36	0.0012	
1	0.1390	36	0.0012	

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Tabla XXII. **Prueba *Duncan* para interacción material*espesor**

Material	Espesor	Media	Tamaño	S. E.	Comparación
0	-1	0.0940	12	0.0020	A B B B B
-1	0	0.1008	12	0.0020	
-1	-1	0.1010	12	0.0021	
-1	1	0.1024	12	0.0021	
0	0	0.1038	12	0.0020	
0	1	0.1098	12	0.0020	C C D
1	-1	0.1114	12	0.0021	
1	0	0.1435	12	0.0021	
1	1	0.1621	12	0.0021	E

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Es importante resaltar que los datos trabajados son los transformados y por lo tanto medias grandes de datos transformados hacen referencia a medias pequeñas en los datos en bruto originales. Es decir que si buscamos el espesor

que tenía la menor tasa de transmisión sería el espesor de 100 milímetros que tenía la media transformada mayor basado en los criterios de las tres pruebas estadísticas de *Tukey*, *Duncan* y *LSD*.

Lo mismo sucede con el tipo de material, el que tiene la menor media de transmisión acústica es aquel que tiene la mayor media transformada y en este caso fue la fibra de lana de roca, esto además se demostró con las tres pruebas estadísticas de *Tukey*, *Duncan* y *LSD*, un análisis similar se realizó para la interacción del tipo de material y el espesor donde la mejor interacción que produce tasas de transmisión acústica menores es la fibra de lana de roca con un espesor de 100 milímetros.

Objetivo 3. Comparar la tasa media de transmisión del cartón contra los otros materiales evaluados mediante un análisis de varianza y la prueba de Hsu para identificar su funcionalidad limitada, se obtuvieron los siguientes resultados:

3.3. Diseño experimental de la fibra, espuma, textil y cartón

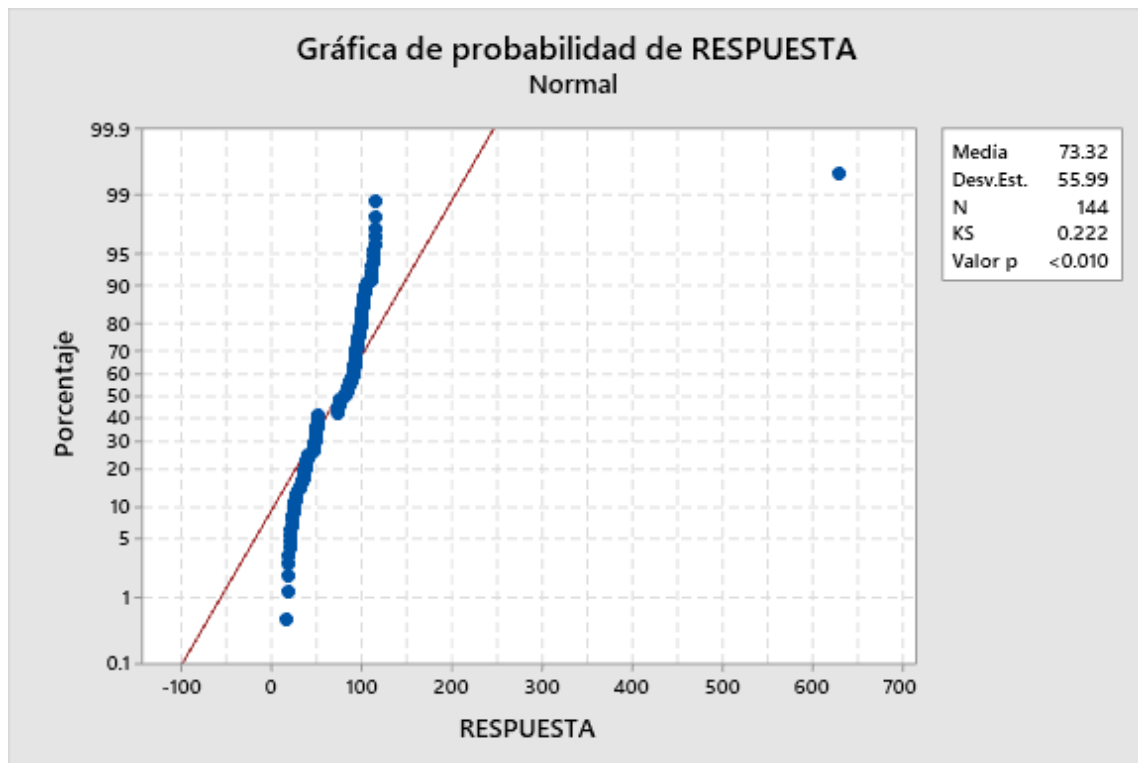
Se volvió a correr el experimento, pero en este caso se tomó un nuevo nivel en el factor tipo de material, este nivel fue el material de cartón. Los resultados obtenidos que responden al tercer objetivo específico planteado se encuentran a continuación:

3.3.1. Comprobación de supuestos del análisis de varianza

Nuevamente se deben de corroborar los 3 supuestos del análisis de varianza: normalidad, homocedasticidad e independencia. Las pruebas que se corrieron fueron las mismas que en el primer ANOVA.

Primero se identificó por medio de un QQ Plot la normalidad de los datos, esto se puede apreciar en el siguiente gráfico:

Figura 19. **QQ Plot ANOVA II Datos sin transformar**

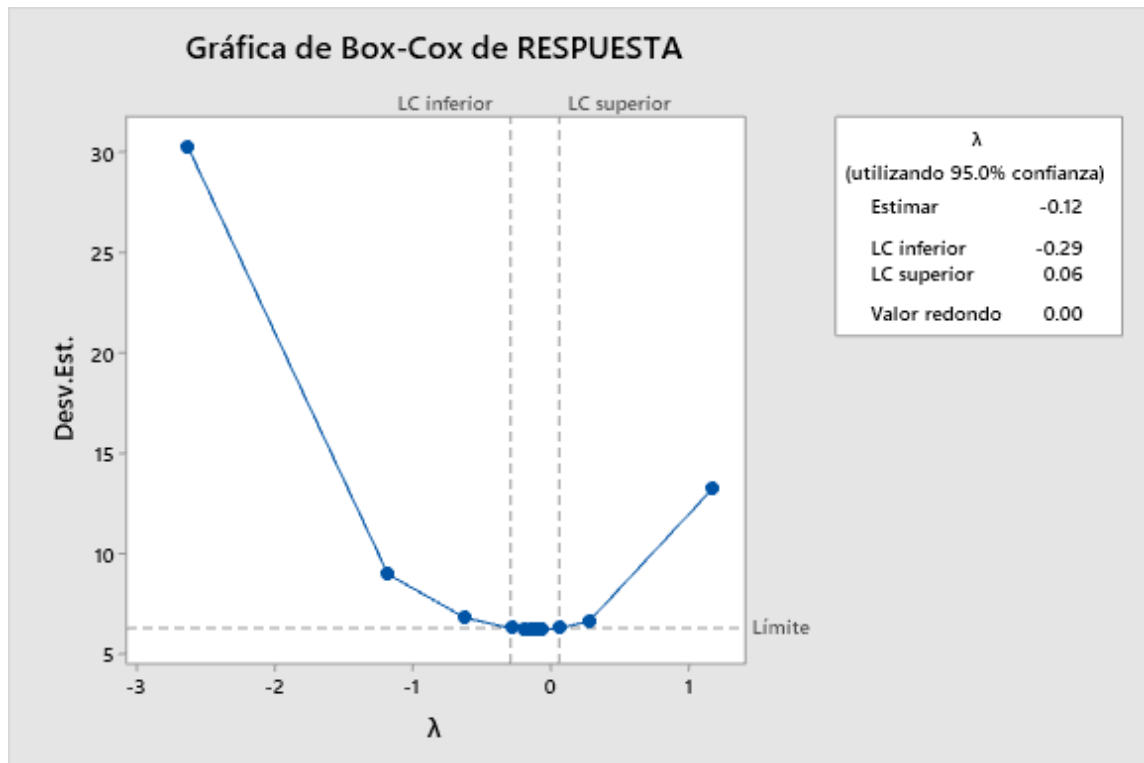


Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

A diferencia del QQ Plot del primer ANOVA, los residuos de los datos sin transformar no se ajustan a la normalidad, pero además se ven altamente sesgados de la misma, para este tipo de casos en lugar de hacer una transformación algebraica como la realizada en el ANOVA anterior, se buscó aplicar con éxito la transformación *Box-Cox*. Esta técnica de transformación de variables le asigna un valor lambda λ a los datos, como el intervalo de confianza

no incluyó el valor 1, entonces la gráfica indicó que se debe aplicar una transformación por normalidad a los datos con un $\lambda = -0.12$.

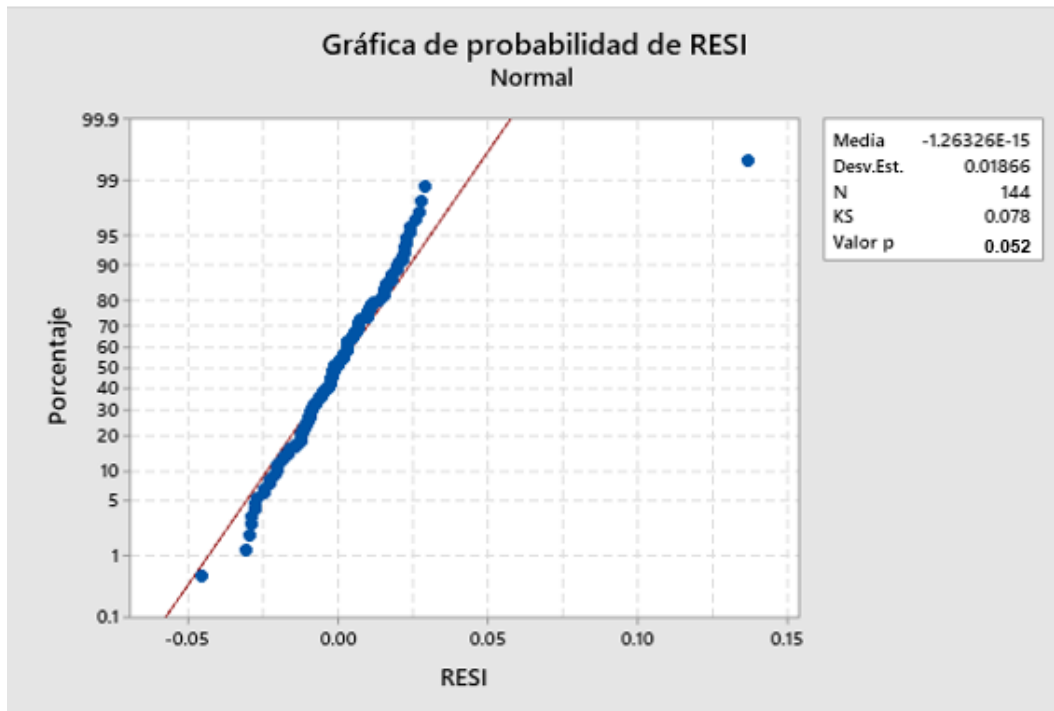
Figura 20. Intervalo de confianza *Box-Cox*



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Los residuos transformados por el método *Box-Cox* se presentan en la siguiente gráfica, en esta se puede apreciar una mejora significativa sobre los datos, se probaron transformaciones algebraicas pero la mejor fue *Box-Cox*.

Figura 21. Datos transformados por *Box-Cox*



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

El siguiente supuesto que se verificó es el de varianza constante por medio de la prueba de homocedasticidad de *Bartlett* utilizando los datos transformados, los resultados obtenidos fueron los siguientes

:

Tabla XXIII. Prueba de homocedasticidad

Prueba	P valor	Criterio
<i>Bartlett</i>	0.0689	Usando un alfa de 0.05 se acepta la homocedasticidad.

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Con la prueba de *Bartlett* se concluyó que los datos son homocedásticos, el último supuesto que se verificó fue el de independencia, este supuesto se analizó nuevamente por medio de la prueba de *Durbin Watson*, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XXIV. **Prueba de independencia**

Prueba	Valor D	D _L crítico inferior	D _U crítico superior	Criterio
<i>Durbin Watson</i>	0.9338	1.6996	1.7559	Si (4-D) es mayor que D _L entonces son independientes. 3.0662 > 1.6996, por lo tanto, hay independencia.

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

De la prueba de *Durbin Watson* se concluyó que los datos si son independientes, ya que cumplió con el criterio establecido por la prueba. Se comprobaron y aceptaron los tres supuestos de todo modelo: normalidad, homocedasticidad e independencia.

3.3.2. **Análisis de varianza de 4x3, con dos bloqueos y una covariable**

Para este segundo análisis de varianza se consideraron nuevamente 2 factores principales:

- Factor tipo de material: este factor tenía cuatro niveles, el primer nivel fue el material de fibra denominado lana de roca e identificado con el número 1, el segundo nivel fue el material de espuma denominado poliestireno e identificado con el número 0.5, el tercer nivel fue el material textil cuyo

nombre es algodón y fue identificado con el -0.5 y el cuarto nivel fue el cartón de huevera y fue identificado con el -1.

- Factor espesor: este factor tenía tres diferentes niveles de espesor: 50, 75 y 100 milímetros, los cuales fueron identificados con -1, 0 y 1 respectivamente. Estos valores fueron seleccionados tomando de referencia la Norma UNE-EN 13162:2002 y son los mismos niveles que se corrieron en el primer ANOVA.
- Los dos bloqueos de la distancia radial y el ángulo de medición, agregado nuevamente la covariable temperatura ambiente.

Los resultados obtenidos por el ANOVA se detallan a continuación:

Tabla XXV. **Diseño factorial 4x3 con covariable y dos bloqueos**

Fuente de error	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio del error	F	P valor
Material	0.1846	3	0.0615	976.3174	<0.0001
Espesor	0.0356	2	0.0178	283.0116	<0.0001
Ángulo	0.0001	3	0.0001	0.3986	0.7542
Distancia radial	0.0017	2	0.0009	13.6485	<0.0001
Material*Espesor	0.0255	6	0.0019	40.4310	<0.0001
Temperatura	0.0002	1	0.0002	3.7212	0.0560
Error	0.0045	126	0.0001		
Total	0.2578	143			

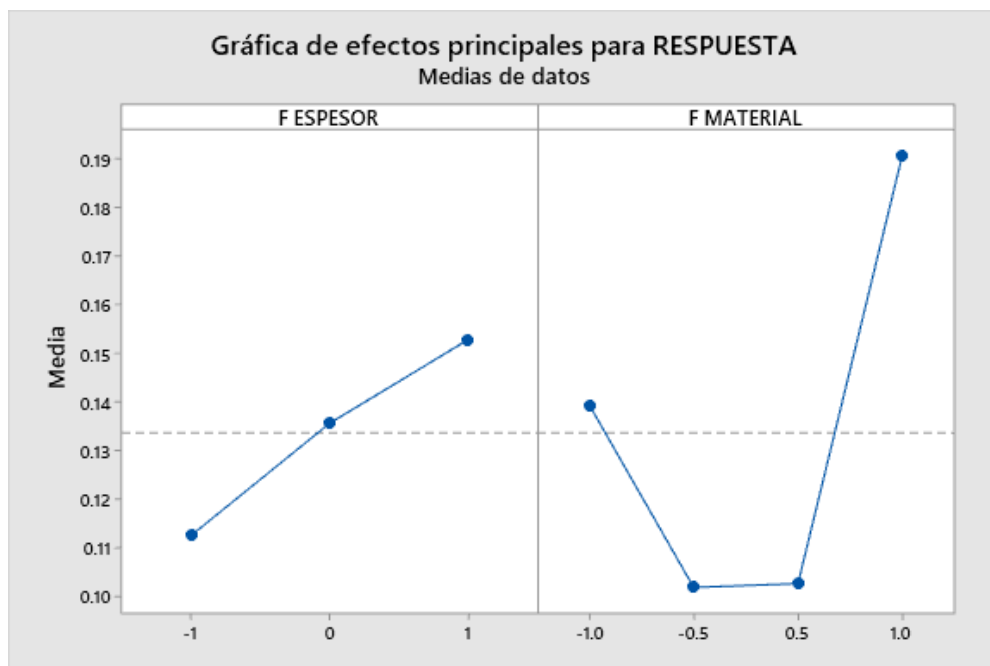
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

De los P valores obtenidos del ANOVA anterior se pudo apreciar que nuevamente el bloqueo del ángulo es no significativo a un 5 %, por lo que para estudios posteriores puede omitirse. Además, el P valor de la covariable se

encuentra en el límite del 5 %. Debido a que en el ANOVA anterior la covariable fue significativa y en este caso su valor se encuentra cercano a la significancia, se concluyó que la covariable es no significativa con un coeficiente de -0.2339.

Los gráficos de efectos principales y el de interacciones nuevamente pueden ser un apoyo visual y respaldo de las conclusiones obtenidas del análisis de varianza, estos gráficos se muestran a continuación:

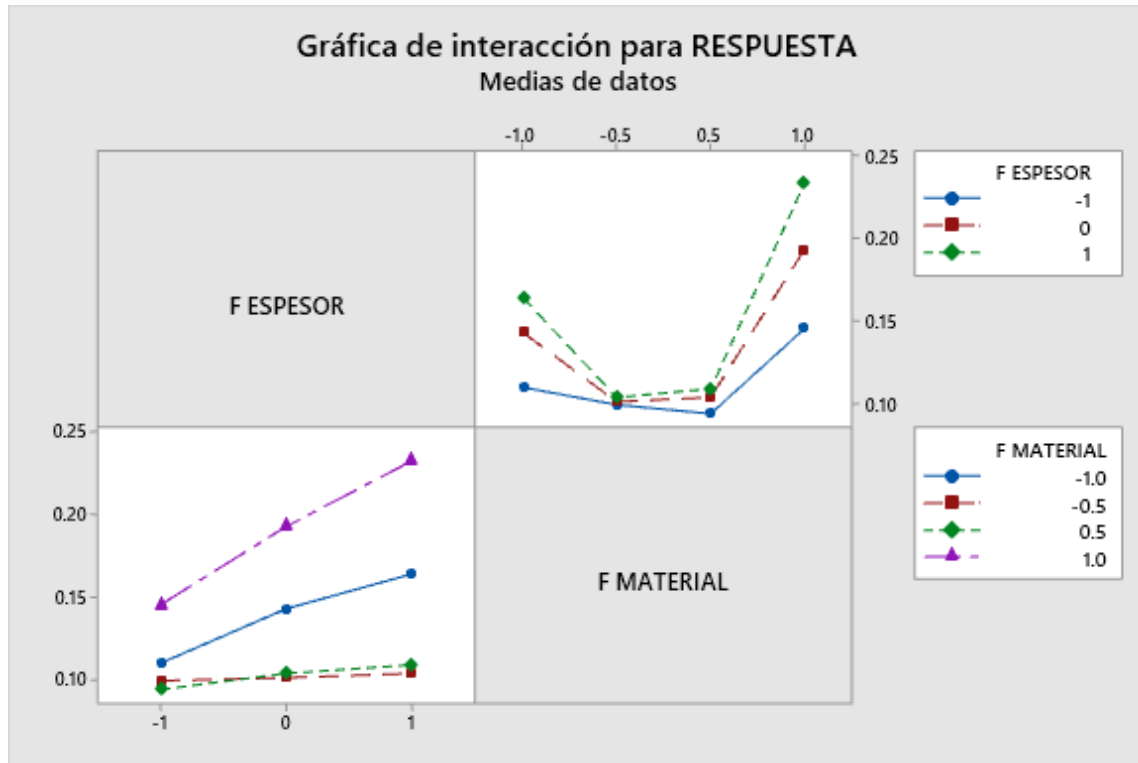
Figura 22. **Gráfico de efectos principales ANOVA 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Del gráfico anterior nuevamente se puede identificar que el factor principal espesor tiene un comportamiento lineal y por lo tanto no hay un efecto de curvatura que este afectando el ajuste del modelo. Para el factor tipo de material por ser cualitativo y no relacionados no es de interés evaluar curvatura.

Figura 23. Gráfico de interacción ANOVA 2



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Del gráfico de interacciones nuevamente se pudo apreciar que hay una interacción significativamente entre los dos factores principales y esto coincide con el análisis de varianza realizado. Se realizó la prueba de falta de ajuste nuevamente en el *software InfoStat*, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla XXVI. Prueba de falta de ajuste

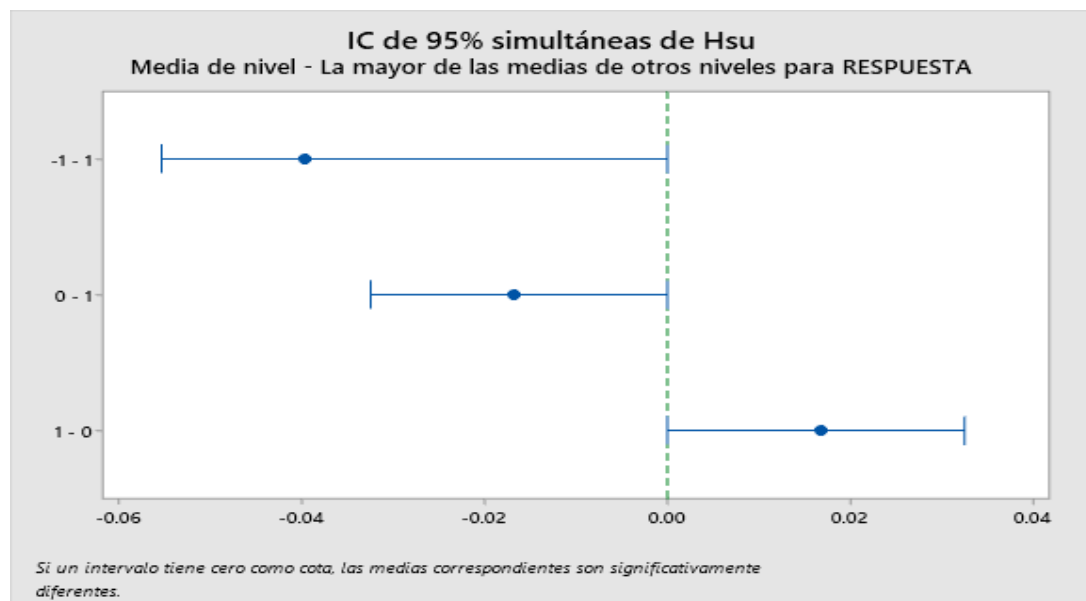
Prueba de falta de ajuste	Estadístico Fisher	Valor P	Criterio
	0.1800	0.6718	Al ser P mayor a 0.05, no hay falta de ajuste

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

3.3.3. Contraste de Hsu para los tipos de material

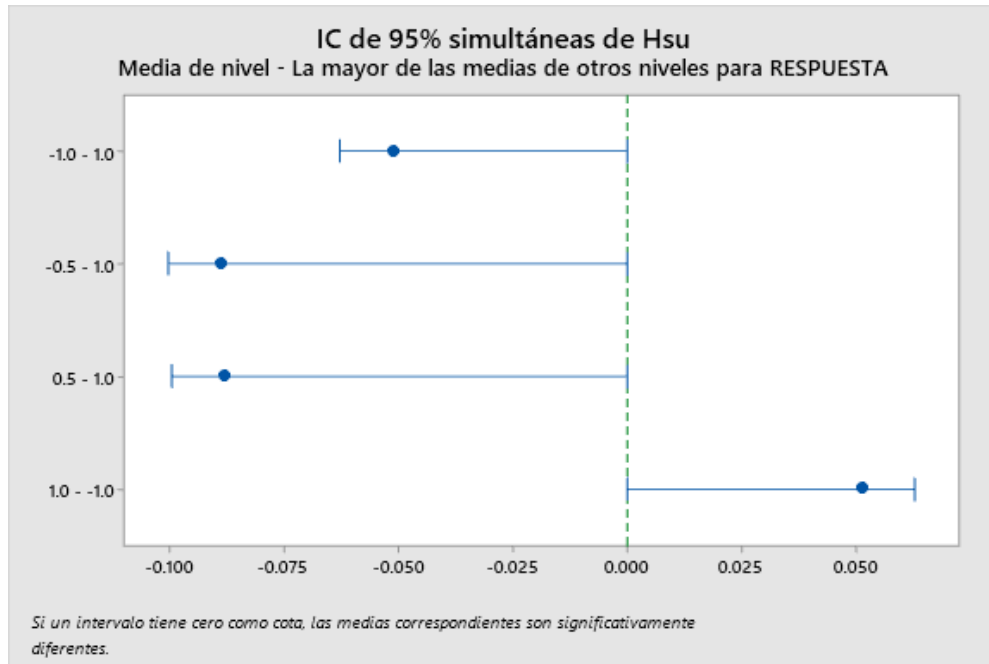
Para el ANOVA 2 la prueba post hoc que se utilizó es la Hsu, esta prueba hace una comparación de un nivel contra todos los demás de un factor. Los gráficos resultantes de la prueba de Hsu se muestran a continuación:

Figura 24. Gráfico Hsu para el espesor



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Figura 25. Gráfica Hsu para el material



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Los gráficos se interpretarán adecuadamente en la discusión de resultados, pero se debe notar que para los niveles más bajos en ambos factores se tienen las mayores tasas de transmisión acústica y lo que se buscó desde un inicio es la menor transmisión del ruido que serían los niveles más altos de los factores de estudio, correspondiendo esto a lo que se buscó con el objetivo general planteado.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presenta la discusión de los resultados que fueron obtenidos al momento de correr los dos diseños experimentales y que se encuentran presentados en el apartado anterior. Es importante mencionar que los análisis de varianza que se realizaron cumplieron con los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad que se mostraron en la sección de resultados y por lo tanto las conclusiones obtenidas son robustas y confiables.

4.1. Análisis interno

En los siguientes apartados se discuten los resultados obtenidos desde la fuente y punto de vista interno del diseño experimental:

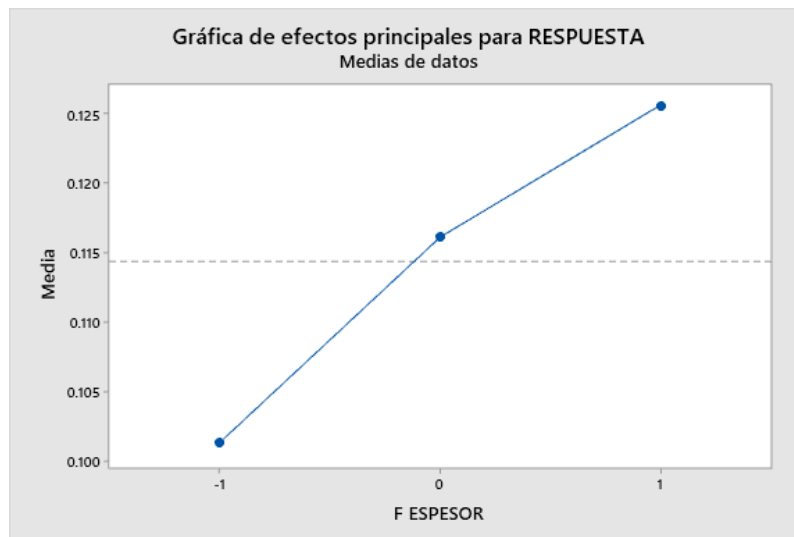
4.1.1. Efecto del espesor

Para el primer ANOVA que se corrió utilizando tres niveles en el factor tipo de material (lana de roca, algodón y poliestireno), se obtuvo que el efecto del factor espesor es significativo a un nivel de significancia del 5 %, esto debido a que el valor P es menor a 0.0001. Debido a que el factor del espesor es significativo, entonces tiene un efecto sobre la variable respuesta que se está estudiando que es la tasa de transmisión acústica.

Debido a lo que se buscó en el experimento era que la tasa transmisión acústica fuera la menor posible y además haciendo énfasis que el nivel más bajo (-1) le correspondía un espesor de 50 milímetros, el nivel intermedio (0) fue de 75 milímetros y el nivel más alto (1) fue de 100 milímetros, se pudo apreciar

ciertos comportamientos en el gráfico de efectos para el espesor que se muestra a continuación:

Figura 26. **Gráfico de efectos factor espesor ANOVA 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

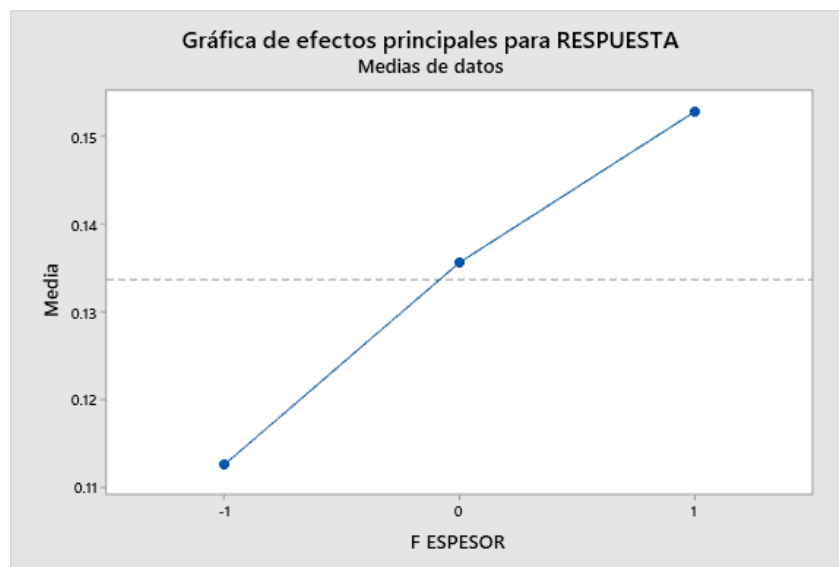
Para la correcta interpretación del gráfico de efectos se debe hacer énfasis en que la variable respuesta fue transformada por medio de la inversa, por lo que las medias transformadas altas hacen referencia a las tasas medias bajas de transmisión acústica. Del gráfico anterior se identificó que el nivel de 100 milímetros de espesor (1) es el que tiene la media transformada más alta que por lo tanto es la media de interés más baja, siendo este nivel el de mayor interés pues se logra mitigar el ruido con estos espesores más altos.

También se pudo apreciar que el gráfico de efectos evidenciaba un posible comportamiento lineal, para esto se corrió la prueba de falta de ajuste para el factor espesor que es el único de tipo cuantitativo y se obtuvo un valor P de 0.54, al ser mayor a la significancia del 5 % entonces se rechazó que hubiera falta de

ajuste y los niveles tienen un comportamiento de tipo lineal. De esto es importante que para futuros estudios se tome en cuenta que al ser un efecto lineal es suficiente tomar dos niveles del factor y no tres como fue el caso de este experimento, esto con el fin de reducir costos, materia prima, esfuerzo y tiempo.

Para el ANOVA 2 que se corrió agregando un nivel extra al tipo de material (cartón), los resultados evidenciaron las mismas conclusiones que ya se especificaron, para este segundo diseño experimental se obtuvo la siguiente gráfica de efectos del espesor:

Figura 27. **Gráfico de efectos factor espesor ANOVA 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

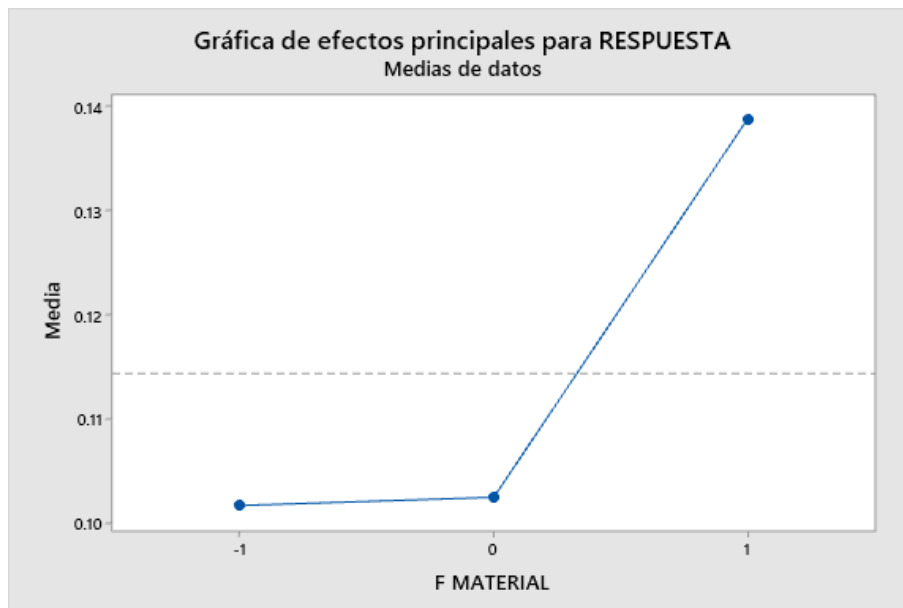
Nuevamente el nivel de espesor de 100 milímetros es el más adecuado pues su media transformada es la mayor y por lo tanto su media real es la menor. También se realizó la prueba de falta de ajuste y con un valor P de 0.6718 que es mayor a la significancia del 5 %, se concluyó que no hay falta de ajuste y

nuevamente se tiene un efecto lineal, con el cuál se puede trabajar únicamente con dos niveles.

4.1.2. Comparación entre los tipos de materiales

Para el primer ANOVA se evaluaron tres niveles del factor tipo de material estos fueron: lana de roca, algodón y poliestireno, siendo la lana de roca el nivel más alto (1), el algodón el nivel más bajo (-1) y el poliestireno el nivel intermedio (0). De este ANOVA se obtuvo que el factor tipo de material fue significativo teniendo un P valor menor a 0.0001, mismo valor que es menor a la significancia estadística del 5 %, con esto se concluyó que este factor tiene un efecto sobre la variable de respuesta tasa media de transmisión acústica. A continuación, se detalla el gráfico de efectos para el primer ANOVA:

Figura 28. Gráfico de efecto del tipo de material ANOVA 1



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

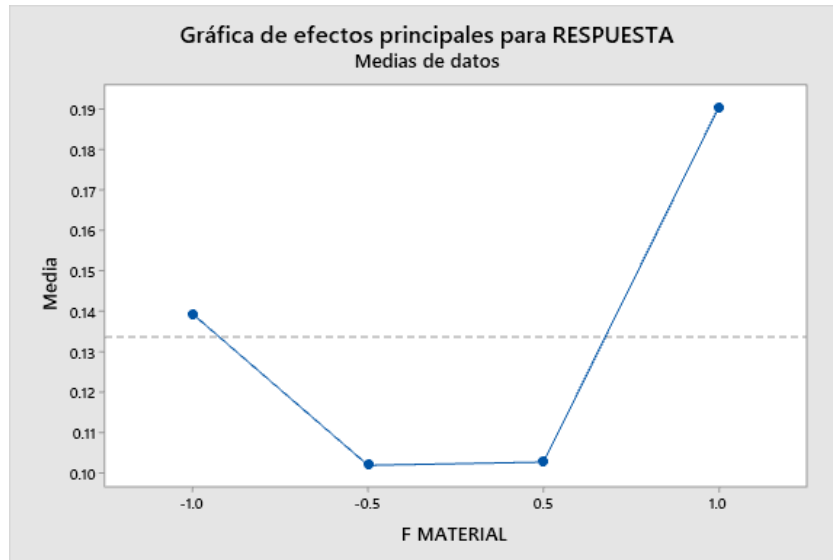
Del gráfico anterior de efectos se pudo identificar que existe una posible curvatura y esto erróneamente llevaría a concluir que pudo haber una falta de ajuste para el tipo de material, se debe hacer la aclaración que al ser niveles de un factor de tipo cualitativo y que además son materiales que por sus características son mutuamente excluyentes, no es válido proponer una evaluación de la falta de ajuste.

Sin embargo, si se puede apreciar nuevamente que el nivel más alto, en este caso la lana de roca tiene la mayor media transformada, lo cual es equivalente a decir la menor tasa media de transmisión acústica, misma que es el interés del experimento.

Para el segundo ANOVA se incluyó un nivel extra para el factor tipo de material, este nivel fue el cartón, siendo este el nivel más bajo (-1), al algodón se le identificó con el nivel intermedio bajo (-0.5), el poliestireno con el nivel intermedio alto (+0.5) y la lana de roca el nivel más alto (1). Nuevamente el factor tipo de material es significativo con un P valor menor a 0.0001 que es menor a la significancia del 5 %.

Del gráfico de efectos para el tipo de material se pudo identificar curvatura, pero por la naturaleza de cada nivel, nuevamente no es válido hacer una prueba de falta de ajuste. Indistintamente se puede identificar que la media transformada para la lana de roca es la mayor, lo que conlleva a que la media real de la tasa de transmisión sea la menor y los resultados vuelven a coincidir como se esperaba con los del primer ANOVA.

Figura 29. **Gráfico de efecto del tipo de material ANOVA 2**

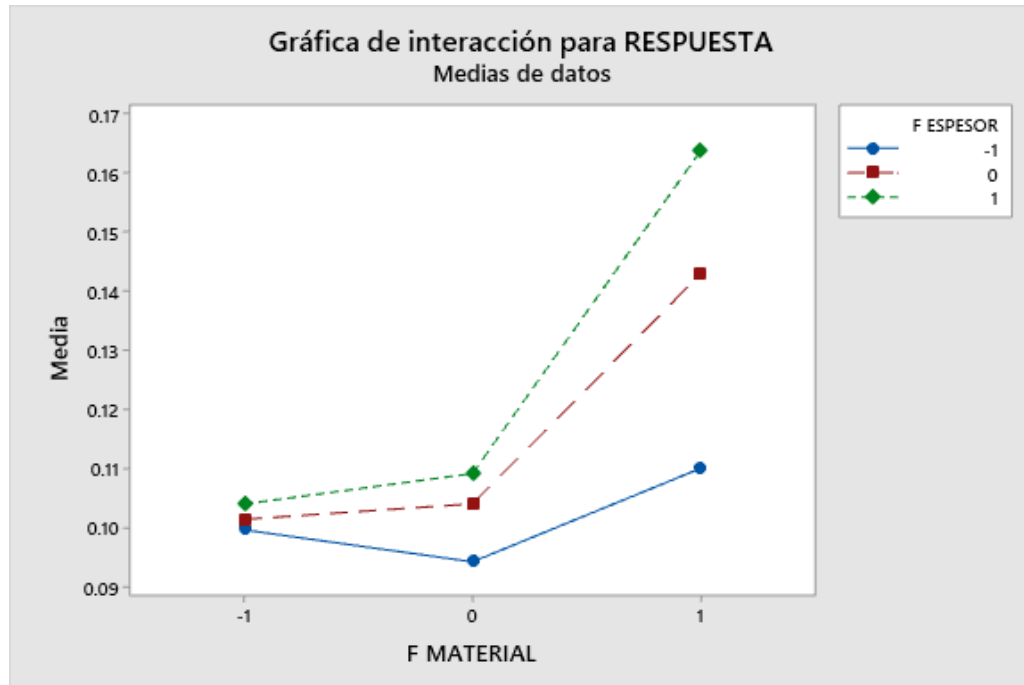


Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

4.1.3. Interacción entre el factor espesor y el factor tipo de material

Para el primer ANOVA que se realizó donde se corrieron para el factor tipo de materiales: lana de roca, poliestireno y algodón; y para el factor espesor, se pudo apreciar que si existía una interacción significativa entre estos dos factores debido a que el valor P era menor a 0.0001. Esto también se pudo apreciar en la gráfica de efectos de interacción que se muestra a continuación, donde se puede apreciar que efectivamente hay una interacción notable entre el tipo de material y el espesor pues estas gráficas llegan a interceptarse y no tienen un comportamiento paralelo.

Figura 30. **Gráfico de interacciones ANOVA 1**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

Se hace la aclaración que debido a que los datos se encuentran transformados a mayores valores medios transformados, se tienen los menores valores reales por lo tanto se pudo apreciar que el tipo de material lana de roca en interacción con el espesor en su nivel más alto, generaban la mayor media transformada, que en el caso real sería la menor media de transmisión acústica, evidenciando que esta combinación es la mejor para la mitigación del ruido.

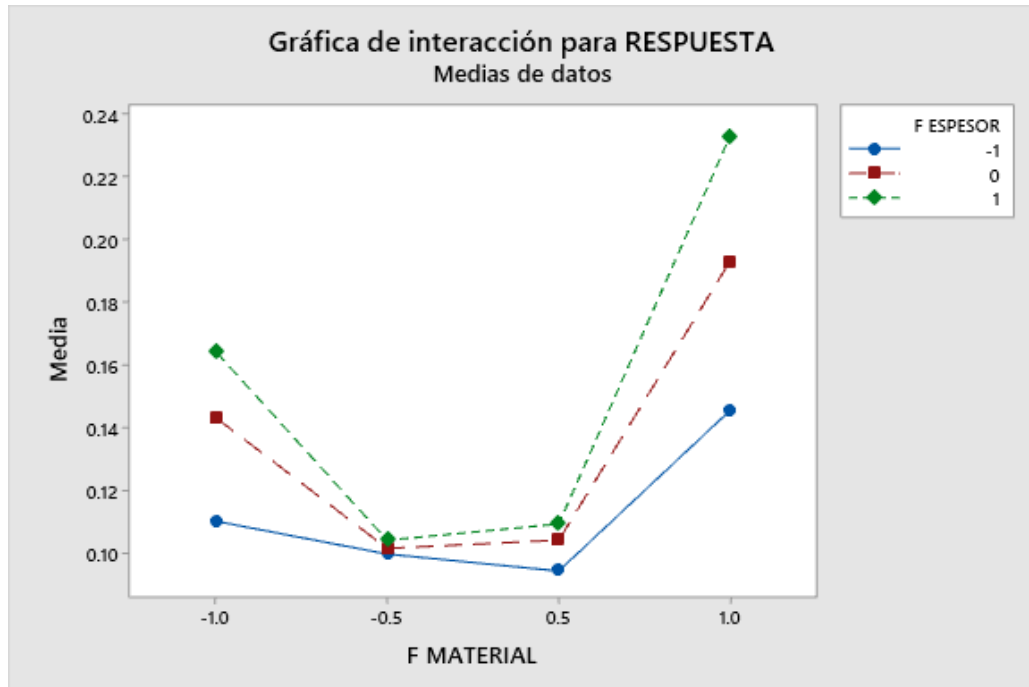
Los resultados del gráfico anterior se pudieron contrastar con los diferentes resultados de las 3 pruebas Post Hoc que se utilizaron:

- La prueba LSD indicó que el nivel del factor espesor de 100 milímetros fue el mejor espesor que aísla el ruido, además también clasificó el nivel lana de roca del factor tipo de material como el mejor material absorbente acústico. Finalmente estimó que la mejor interacción para la absorción adecuada acústica fue un espesor de 100 milímetros con el material lana de roca.
- La prueba de *Duncan* y de *Tukey* fueron igual de concluyentes que la prueba *LSD*, indicando que el nivel 100 milímetros del factor espesor y el nivel lana de roca del factor tipo de material, eran los mejores en conjunto con su interacción para la mitigación del ruido.

Para el segundo ANOVA, la modificación fue que se agregó un nuevo nivel al factor tipo de material, el cual fue el cartón de huevera. Los resultados obtenidos concluyeron de manera similar. A continuación, se detalla la gráfica de interacciones donde se puede apreciar que nuevamente el espesor de 100 milímetros en conjunto con el tipo de material lana de roca, generan el mejor aislamiento acústico.

En este caso la prueba Post Hoc utilizada fue la de Hsu, de esta comparación se pudo concluir que de todas las medias para los niveles del factor de espesor la más grande fue para el espesor de 100 milímetros, pues su intervalo se encuentra por arriba de cero, para el factor tipo de material también la prueba de Hsu concluyó que la mejor media es la del nivel de lana de roca, evidenciando que el cartón de huevera no tiene las características adecuadas para la mitigación correcta del ruido. Además, se debe de recordar que como las medias transformadas mayores son las reales menores, entonces nuevamente se tubo coherencia con la gráfica de interacciones de los dos factores principales.

Figura 31. **Gráfico de interacciones ANOVA 2**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab.

4.1.4. Efecto de la temperatura como una covariable

La temperatura fue una variable que estuvo presente y debido a que a muy altas temperaturas los materiales pueden expandirse y generan transmisiones acústicas, se decidió medirla y evaluarla con el fin de determinar si tenía un efecto dentro de cada diseño experimental.

Para el primer ANOVA la covariable tuvo un valor P de 0.0023, al ser menor que la significancia del 5 %, se concluyó que la temperatura no tuvo un efecto significativo en el primer diseño experimental. En el segundo ANOVA se obtuvo un valor P de 0.056, debido a que el valor P se encuentra cercano al límite de significancia del 5 %, anidado a que en el primer ANOVA no fue significativa la

temperatura y conociendo que ambos experimentos fueron realizados en las mismas condiciones experimentales, se decidió no ser estrictos en la evaluación de la significancia y concluir que la covariable temperatura no tuvo un efecto fuertemente significativo en el segundo diseño experimental.

4.1.5. Efecto de los factores de bloqueo

Para las dos ANOVAs que se realizaron se tomaron en cuenta dos factores de bloqueo, es decir que sus interacciones con los factores principales no fueron de interés, pero si su posible significancia en el aparte a la variabilidad del diseño experimental, los factores de bloqueo fueron los siguientes:

- Factor de bloqueo para el ángulo: en ambos diseños experimentales se midió el ángulo radial donde se tomó la medición respectiva de la tasa acústica. En el primer ANOVA se obtuvo un valor P mayor a la significancia del 5 %, dicho valor P fue de 0.2513 y se rechazó tener un efecto significativo dentro del análisis de varianza. Para el segundo ANOVA se concluyó de la misma forma pues se obtuvo un valor P de 0.7542.
- Factor de bloqueo para la distancia radial: este factor fue incluido en los dos diseños experimentales. Para el primer ANOVA se obtuvo un valor P de 0.0058, al ser menor que el 5 % de la significancia entonces este factor de bloqueo si aporta variabilidad al experimento y debe de considerarse para reducir sesgos en las conclusiones estadísticas. El segundo ANOVA fue igual de concluyente con este factor de bloqueo debido a que se obtuvo un valor P menor a 0.0001.

Se pudo apreciar que, de los dos factores de bloqueo, la distancia radial fue el único que fue significativo y por lo tanto debe de tomarse en cuenta siempre

que se realice un diseño experimental bajo las mismas características. El factor de bloqueo del ángulo de medición pudo omitirse pues no aportó nada al análisis de varianza del experimento.

4.2. Análisis externo

Con el análisis externo se identificó que se obtuvieron las mismas conclusiones que el estudio realizado por Inche, Chung y Chia (2010), donde demostraron que la lana de roca es el mejor material para la absorción acústica contra los textiles. La diferencia radicó en que el diseño experimental propio evaluó otras categorías tales como las espumas y el cartón, siendo su alcance mayor al del estudio realizado por Inche.

Las características, ventajas y desventajas mostradas por Porras (2015) en su comparación de materiales acústicos como parte del análisis externo, lograron coincidir con los objetivos trazados en el experimento, el concluyó que el poliestireno no era un material adecuado y que los materiales porosos como la lana de roca eran los aislantes ideales para la mitigación de ruido, dichas comparaciones coincidieron con los resultados obtenidos del experimento.

CONCLUSIONES

1. Al comparar con los diferentes niveles del factor espesor mediante un análisis de varianza se pudo inferir que el efecto fue estadísticamente significativo, identificándose que entre mayor es la dimensión del espesor mayor es el aislamiento acústico que se obtiene y por lo tanto una menor tasa media de transmisión acústica. Además, el factor tiene un comportamiento lineal por lo que es adecuado incluir solamente dos niveles de este factor para reducir tiempo y costos.
2. Al contrastar las diferencias en las tasas medias de transmisión de la lana de roca, el poliestireno y el algodón mediante un análisis de varianza y pruebas post hoc se pudo identificar que el efecto del factor principal tipo de material también fue significativo, identificando diferencias estadísticas entre los cuatro tipos de materiales: lana de roca, poliestireno, algodón y cartón de huevera. Además, las tres pruebas Post Hoc; LSD, *Tukey* y *Duncan*, concluyeron para el primer ANOVA que el tipo de material lana de roca es el mejor aislante acústico pues la tasa de transmisión acústica es la menor. Además, se concluyó que la interacción entre el espesor de 100 milímetros y el material lana de roca es la mejor combinación de ambos factores principales que logran la óptima mitigación del ruido.
3. Durante la comparación de la tasa media de transmisión del cartón contra los otros materiales evaluados mediante un análisis de varianza y la prueba de Hsu se concluyó que el mejor tipo de material aislante es la lana de roca, siendo la tasa media de transmisión acústica menor al poliestireno, al algodón y al cartón de huevera y por lo tanto cumpliendo

con la máxima mitigación del ruido. Para el tipo de espesor la prueba de Hsu contrastó el espesor de 100 milímetros como el mejor espesor para aislar adecuadamente el ruido. Nuevamente se obtuvo que la interacción óptima es el material lana de roca con un espesor de 100 milímetros, siendo superior a cualquier interacción relacionada al cartón de huevera y por lo tanto desacreditando el uso de este en sistemas masa-muelle-masa.

4. Se determinó que entre los materiales de mayor aplicación para la mitigación de ruido en los sistemas masa-muelle-masa, el mejor absorbente es la lana de roca de la familia de las fibras y que entre mayor es el espesor que se le asigna mejor es el aislamiento acústico que este provee al sistema y con el cual se logrará la reducción de enfermedades ocupacionales provocadas por altas exposiciones o malas mitigaciones del ruido.

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere incluir en todo diseño experimental cualquier posible factor de bloqueo, pues puede ser significativo y aportar error al análisis de varianza, como fue el caso del factor de bloqueo distancia radial que fue corrido en los dos ANOVAS obtenidos.
2. Se hace necesario introducir en el diseño experimental la covariable temperatura debido a que según las condiciones bajo las cuales se corra el experimento, la temperatura puede influir en las propiedades de cada uno de los tipos de materiales que se someterán al análisis.
3. Se sugiere identificar las características, ventajas y desventajas de cada uno de los niveles de un determinado factor, de esta manera se puede contrastar las características teóricas con las inferencias obtenidas de los análisis de varianza y pruebas post hoc, de no ser coherentes se puede poner en duda el propio experimento.
4. Se hace necesario realizar un estudio de tipo longitudinal con los factores principales: tipo de material y espesor. Con el fin de analizar las propiedades de cada material a lo largo del tiempo por medio de una serie temporal y de esta manera identificar la vida útil que tiene cada material donde sus propiedades de mitigación de ruido disminuyen considerablemente. Para el análisis de varianza se recomienda agregar el tiempo como una covariable de estudio.

REFERENCIAS

1. Acuerdo Gubernativo número 229-2014. Emitido por el Presidente de la República de Guatemala. 23 de julio de 2014. Diario de Centroamérica, No. 16.
2. Bautista, E. (2008). *Diseño y análisis de experimentos, fundamentos y aplicación en agronomía*. Guatemala, Guatemala: Editorial Universitaria. Recuperado de http://cete.fausac.gt/wpcontent/uploads/2020/11/Diseno_y_Analisis_de_Experimentos_2016a.pdf
3. Castellanos, J. y Cortés, S. (2010). *Diseño y construcción de elementos absorbentes selectivos con frecuencia de resonancia variable*. (Tesis de maestría). Universidad de San Buenaventura, Bogotá. Recuperado de <http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59905.pdf>
4. Centro de Calidad Ambiental (1992). *Norma Mexicana DGN-AA-43-1977: Determinación del nivel sonoro emitido por fuentes fijas*; Dirección General de Normas Mexicanas, México. Recuperado de <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa043.pdf>
5. Fundación Vida Sostenible (2015). *Edificación Sostenible: Aislamiento*. Ministerio para la Transición Ecológica; España. Recuperado de <https://tecnohotelnews.com/2020/02/16/edificacion-factor-clave-sostenibilidad/>

6. Gutiérrez (2012). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Estado de México, México: McGraw-Hill.
7. Hernández (2018). *Metodología de la Investigación*. Estado de México, México: McGraw-Hill.
8. Inche, M., Chung, A., y Chia, R. (Enero, 2010). Diseño y desarrollo de nuevos materiales textiles para el aislamiento y acondicionamiento acústico. *Diseño y Tecnología* 13(1), 1-8. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/816/81619989012.pdf>
9. Montgomery (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos*. Estado de México, México: Limusa-Wiley.
10. Naf-Cortés (2013). *Guía Práctica para el Análisis y la Gestión del Ruido Industrial*. (1ª ed.). Madrid, España: Imagen Artes Gráficas S. A. Recuperado de http://invassat.gva.es/va/visor-biblioteca/-/asset_publisher/LvSYKI0K6pLa/content/naf-cortes-robert-r-2013-guia-practica-para-el-analisis-y-la-gestion-del-ruido-industrial
11. Niebel (2009). *Ingeniería Industrial, métodos, tiempos y movimientos*. Estado de México., México: Alfaomega. Recuperado de https://www.academia.edu/7731445/Ingenier%C3%ADa_Industrial_12ma_Niebel_y_Freivalds
12. Pérez (2014). *Diseño de experimentos aplicados a proyectos*. Guanajuato; México: ECORFAN. Recuperado de https://www.ecorfan.org/handbooks/Ciencias%20Naturales%20T-II/Articulo_27.pdf

13. Porras (2015). *Diseño de Aislamiento y Acondicionamiento Acústico para los estudios de emisión y grabación de la nueva sede de la Emisora Kennedy*. (Tesis de licenciatura) Universidad de San Buenaventura; Bogotá. Recuperado de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/33579/memoria.pdf>.
14. Quispe (2014). *Obtención de arcilla modificada apilarada y su aplicación como material adsorbente en efluentes industriales contaminados con metales pesados*. (Tesis de licenciatura). Universidad Nacional de San Agustín, Perú. Recuperado de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/3967>
15. Salgado (2011). *Metodología de superficie de respuesta aplicado a la optimización de propiedades mecánicas de un compuesto de residuos de madera y plástico reciclado*. (Tesis de maestría) Postgrado Institucional Ciencia y Tecnología de México, México. Recuperado de <https://ciatec.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1019/48>
16. Siegel (1990). *Estadística no paramétrica en la conducta científica*. Singapur, Singapur: McGraw-Hill.
17. Tanco, M., Ilzarbe, L. (Julio, 2008). Aplicación del Diseño de Experimentos para la mejora de procesos de automoción. *Memorias de la universidad de Navarra* 1(6), 3-5. Recuperado de <http://revistas.um.edu.uy/index.php/ingenieria/article/view/265>
18. Torres (2018). *Ingeniería de plantas*. Guatemala, Guatemala: C. C. DAPAL.

19. Villalpando, J. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, Hsu y Bechhofer para selección de medias. *Agrociencia* 35(1), 18-82. Recuperado de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30235107&idp=1&cid=4033501>
20. Walpole (2007). *Probabilidad y estadística*. Estado de México, México: McGraw-Hill.

APÉNDICES

Apéndice 1. Datos transformados ANOVA 1

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA	COV TEMP
-1	-1	0	60	0.09838975	21.7
-1	-1	0	80	0.10010015	21.7
-1	-1	0	100	0.10303257	21.7
-1	-1	90	60	0.09726632	21.7
-1	-1	90	80	0.0994545	21.6
-1	-1	90	100	0.10015034	21.6
-1	-1	180	60	0.09862873	21.6
-1	-1	180	80	0.09975093	21.6
-1	-1	180	100	0.10050378	21.6
-1	-1	270	60	0.09829464	21.6
-1	-1	270	80	0.0998006	21.6
-1	-1	270	100	0.10060545	21.6
0	-1	0	60	0.10132591	21.6
0	-1	0	80	0.10190297	21.6
0	-1	0	100	0.10341754	21.6
0	-1	90	60	0.09925833	21.5
0	-1	90	80	0.10137797	21.5
0	-1	90	100	0.10276022	21.6
0	-1	180	60	0.1	21.6
0	-1	180	80	0.10040242	21.6
0	-1	180	100	0.10249001	21.6
0	-1	270	60	0.09930727	21.6
0	-1	270	80	0.10153462	21.6
0	-1	270	100	0.10358385	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 2. Datos transformados ANOVA 1

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA	COV TEMP
1	-1	0	60	0.10308731	21.6
1	-1	0	80	0.10437072	21.5
1	-1	0	100	0.10488613	21.5
1	-1	90	60	0.10325203	21.5
1	-1	90	80	0.10420059	21.5
1	-1	90	100	0.10546786	21.5
1	-1	180	60	0.10347289	21.6
1	-1	180	80	0.1040313	21.6
1	-1	180	100	0.10582159	21.6
1	-1	270	60	0.10060545	21.6
1	-1	270	80	0.10425721	21.6
1	-1	270	100	0.10505964	21.6
-1	1	0	60	0.11624764	21.6
-1	1	0	80	0.11463248	21.6
-1	1	0	100	0.1165631	21.6
-1	1	90	60	0.11593472	21.6
-1	1	90	80	0.11616917	21.6
-1	1	90	100	0.11680139	21.8
-1	1	180	60	0.03979046	21.8
-1	1	180	80	0.11632626	21.6
-1	1	180	100	0.11760637	21.6
-1	1	270	60	0.11624764	21.6
-1	1	270	80	0.11680139	21.6
-1	1	270	100	0.11768779	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 3. Datos transformados ANOVA 1

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA	COV TEMP
0	1	0	60	0.14170505	21.6
0	1	0	80	0.14617634	21.6
0	1	0	100	0.14300314	21.6
0	1	90	60	0.14099899	21.6
0	1	90	80	0.14213381	21.6
0	1	90	100	0.14824986	21.6
0	1	180	60	0.13961797	21.8
0	1	180	80	0.14099899	21.6
0	1	180	100	0.14256649	21.6
0	1	270	60	0.13989093	21.6
0	1	270	80	0.14418745	21.6
0	1	270	100	0.14479075	21.6
1	1	0	60	0.15791661	21.6
1	1	0	80	0.16736548	21.6
1	1	0	100	0.16831106	21.6
1	1	90	60	0.16074761	21.6
1	1	90	80	0.16484512	21.6
1	1	90	100	0.16308202	21.6
1	1	180	60	0.15851066	21.5
1	1	180	80	0.16222142	21.5
1	1	180	100	0.16736548	21.5
1	1	270	60	0.16158484	21.5
1	1	270	80	0.16395646	21.5
1	1	270	100	0.16831106	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 4. Datos transformados ANOVA 1

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA	COV TEMP
-1	0	0	60	0.09337235	21.6
-1	0	0	80	0.09386465	21.7
-1	0	0	100	0.0945756	21.5
-1	0	90	60	0.09390603	21.7
-1	0	90	80	0.0951303	21.6
-1	0	90	100	0.09374085	21.6
-1	0	180	60	0.09369969	21.6
-1	0	180	80	0.09504432	21.6
-1	0	180	100	0.09521651	21.6
-1	0	270	60	0.09333167	21.4
-1	0	270	80	0.09394746	21.6
-1	0	270	100	0.0955637	21.6
0	0	0	60	0.10276022	21.6
0	0	0	80	0.10431391	21.7
0	0	0	100	0.10605939	21.6
0	0	90	60	0.10060545	21.6
0	0	90	80	0.10238252	21.6
0	0	90	100	0.10546786	21.6
0	0	180	60	0.10127394	21.5
0	0	180	80	0.10454167	21.5
0	0	180	100	0.10570328	21.6
0	0	270	60	0.10363946	21.6
0	0	270	80	0.10511767	21.6
0	0	270	100	0.10696564	21.6
1	0	0	60	0.10617889	21.6
1	0	0	80	0.10802135	21.6
1	0	0	100	0.10989675	21.6
1	0	90	60	0.10795838	21.6
1	0	90	80	0.11023007	21.6
1	0	90	100	0.10878566	21.6
1	0	180	60	0.10930431	21.6
1	0	180	80	0.11016316	21.6
1	0	180	100	0.11208396	21.6
1	0	270	60	0.10758287	21.6
1	0	270	80	0.11056645	21.7
1	0	270	100	0.10930431	21.7

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 5. Dos transformados ANOVA 2

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA TRANSFOR MADA	COV TEMP
-1	1	0	60	0.14232758	21.6
-1	1	0	80	0.14408971	21.7
-1	1	0	100	0.14670198	21.5
-1	1	90	60	0.14423953	21.7
-1	1	90	80	0.14879835	21.6
-1	1	90	100	0.14364305	21.6
-1	1	180	60	0.14349508	21.6
-1	1	180	80	0.14846997	21.6
-1	1	180	100	0.14912891	21.6
-1	1	270	60	0.14218363	21.4
-1	1	270	80	0.14438981	21.6
-1	1	270	100	0.15047354	21.6
0	1	0	60	0.18453959	21.6
0	1	0	80	0.1940225	21.7
0	1	0	100	0.20600472	21.6
0	1	90	60	0.17286488	21.6
0	1	90	80	0.18237842	21.6
0	1	90	100	0.20176742	21.6
0	1	180	60	0.17632384	21.5
0	1	180	80	0.19550014	21.5
0	1	180	100	0.20343074	21.6
0	1	270	60	0.18978287	21.6
0	1	270	80	0.19934721	21.6
0	1	270	100	0.2128931	21.6
1	1	0	60	0.20688467	21.6
1	1	0	80	0.22160278	21.6
1	1	0	100	0.2393001	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 6. Datos transformados ANOVA 2

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA TRANSFOR MADA	COV TEMP
1	1	90	60	0.22106057	21.6
1	1	90	80	0.24280214	21.6
1	1	90	100	0.228437	21.6
1	1	180	60	0.23336092	21.6
1	1	180	80	0.24208943	21.6
1	1	180	100	0.26479556	21.6
1	1	270	60	0.21788883	21.6
1	1	270	80	0.24646263	21.7
1	1	270	100	0.23336092	21.7
-1	-0.5	0	60	0.09854919	21.7
-1	-0.5	0	80	0.10026808	21.7
-1	-0.5	0	100	0.10321574	21.7
-1	-0.5	90	60	0.09742035	21.7
-1	-0.5	90	80	0.09961918	21.6
-1	-0.5	90	100	0.10031852	21.6
-1	-0.5	180	60	0.09878934	21.6
-1	-0.5	180	80	0.0999171	21.6
-1	-0.5	180	100	0.10067375	21.6
-1	-0.5	270	60	0.09845361	21.6
-1	-0.5	270	80	0.09996702	21.6
-1	-0.5	270	100	0.10077594	21.6
0	-0.5	0	60	0.1015001	21.6
0	-0.5	0	80	0.10208017	21.6
0	-0.5	0	100	0.10360278	21.6
0	-0.5	90	60	0.09942205	21.5
0	-0.5	90	80	0.10155243	21.5
0	-0.5	90	100	0.10294193	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 7. Datos transformados ANOVA 2

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA TRANSFOR MADA	COV TEMP
0	-0.5	180	60	0.10016742	21.6
0	-0.5	180	80	0.10057187	21.6
0	-0.5	180	100	0.10267029	21.6
0	-0.5	270	60	0.09947122	21.6
0	-0.5	270	80	0.10170989	21.6
0	-0.5	270	100	0.10376998	21.6
1	-0.5	0	60	0.10327077	21.6
1	-0.5	0	80	0.10456114	21.5
1	-0.5	0	100	0.1050794	21.5
1	-0.5	90	60	0.10343637	21.5
1	-0.5	90	80	0.10439008	21.5
1	-0.5	90	100	0.10566438	21.5
1	-0.5	180	60	0.10365842	21.6
1	-0.5	180	80	0.10421986	21.6
1	-0.5	180	100	0.10602009	21.6
1	-0.5	270	60	0.10077594	21.6
1	-0.5	270	80	0.10444701	21.6
1	-0.5	270	100	0.10525387	21.6
-1	-1	0	60	0.11651106	21.6
-1	-1	0	80	0.11488503	21.6
-1	-1	0	100	0.11682868	21.6
-1	-1	90	60	0.11619602	21.6
-1	-1	90	80	0.11643206	21.6
-1	-1	90	100	0.11706861	21.8
-1	-1	180	60	0.03980097	21.8
-1	-1	180	80	0.11659023	21.6
-1	-1	180	100	0.11787918	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

Apéndice 8. Datos transformados ANOVA 2

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA TRANSFOR MADA	COV TEMP
-1	-1	270	60	0.11651106	21.6
-1	-1	270	80	0.11706861	21.6
-1	-1	270	100	0.11796117	21.6
0	-1	0	60	0.14218363	21.6
0	-1	0	80	0.14670198	21.6
0	-1	0	100	0.14349508	21.6
0	-1	90	60	0.14147042	21.6
0	-1	90	80	0.14261678	21.6
0	-1	90	100	0.14879835	21.6
0	-1	180	60	0.14007559	21.8
0	-1	180	80	0.14147042	21.6
0	-1	180	100	0.14305391	21.6
0	-1	270	60	0.14035126	21.6
0	-1	270	80	0.14469179	21.6
0	-1	270	100	0.14530149	21.6
1	-1	0	60	0.15858043	21.6
1	-1	0	80	0.16815685	21.6
1	-1	0	100	0.16911603	21.6
1	-1	90	60	0.16144806	21.6
1	-1	90	80	0.16560098	21.6
1	-1	90	100	0.16381369	21.6
1	-1	180	60	0.15918206	21.5
1	-1	180	80	0.16294148	21.5
1	-1	180	100	0.16815685	21.5
1	-1	270	60	0.16229639	21.5
1	-1	270	80	0.16470006	21.5
1	-1	270	100	0.16911603	21.6

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

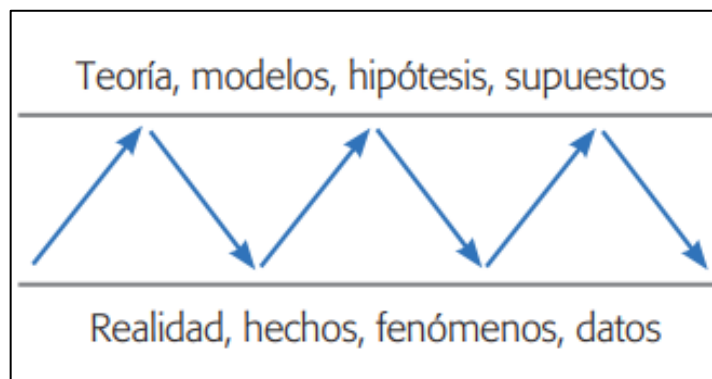
Apéndice 9. Datos transformados ANOVA 2

F ESPESOR	F MATERIAL	BLOQUEO ANGULO	BLOQUEO RADIO	RESPUESTA TRANSFOR MADA	COV TEMP
-1	0.5	0	60	0.09350856	21.6
-1	0.5	0	80	0.09400303	21.7
-1	0.5	0	100	0.09471716	21.5
-1	0.5	90	60	0.09404459	21.7
-1	0.5	90	80	0.09527437	21.6
-1	0.5	90	100	0.09387868	21.6
-1	0.5	180	60	0.09383734	21.6
-1	0.5	180	80	0.09518801	21.6
-1	0.5	180	100	0.09536097	21.6
-1	0.5	270	60	0.09346771	21.4
-1	0.5	270	80	0.09408621	21.6
-1	0.5	270	100	0.09570975	21.6
0	0.5	0	60	0.10294193	21.6
0	0.5	0	80	0.10450403	21.7
0	0.5	0	100	0.10625924	21.6
0	0.5	90	60	0.10077594	21.6
0	0.5	90	80	0.10256223	21.6
0	0.5	90	100	0.10566438	21.6
0	0.5	180	60	0.10144786	21.5
0	0.5	180	80	0.10473304	21.5
0	0.5	180	100	0.10590112	21.6
0	0.5	270	60	0.1038259	21.6
0	0.5	270	80	0.10531222	21.6
0	0.5	270	100	0.10717067	21.6
1	0.5	0	60	0.10637942	21.6
1	0.5	0	80	0.10823253	21.6
1	0.5	0	100	0.11011917	21.6
1	0.5	90	60	0.1081692	21.6
1	0.5	90	80	0.11045453	21.6
1	0.5	90	100	0.10900138	21.6
1	0.5	180	60	0.10952314	21.6
1	0.5	180	80	0.11038721	21.6
1	0.5	180	100	0.11231998	21.6
1	0.5	270	60	0.10779149	21.6
1	0.5	270	80	0.11079297	21.7
1	0.5	270	100	0.10952314	21.7

Fuente: elaboración propia, empleando Word.

ANEXO

Anexo 1. **Proceso interactivo experimental**



Fuente: Gutiérrez (2012). *Análisis y Diseño Experimental*.