DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Y FABRICACIÓN
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

TÍTULO DE LA TESIS:

**INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA URBANA EN LOS NIVELES DE
INMISIÓN GENERADOS POR EL RUIDO DE AVIACIÓN**

AUTOR:

MÁSTER RODRIGO ERNESTO FLORES CASTILLO

DIRECTOR:

DOCTOR CÉSAR ASENSIO RIVERA

2019

TRIBUNAL

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día _____.

Presidente: Dr.

Vocales: Dr.

Dr.

Dr.

Secretario: Dr.

Suplentes: Dr.

Dr.

Realizado el acto de lectura y defensa de la Tesis Doctoral el de de en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

Calificación:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

DEDICATORIA

La acústica siempre me ha gustado y desde pequeño la he querido estudiar. Una persona que me inspiró con sus consejos para llegar hasta donde estoy y sigo llevando conmigo todas sus enseñanzas fue mi abuelo Ernesto. Esta dedicatoria es para ti y espero que estés orgulloso de mí donde quiera que estés.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero que nada a mis padres por todo el apoyo que me dieron para hacer este sueño realidad.

También tengo que darle las gracias a mi hermano Francisco, quien siempre me escuchó cuando necesitaba a alguien con quien hablar y por siempre estar ahí cuando le necesitaba.

A lo largo del desarrollo de esta tesis los miembros de la familia Gómez Fernández me trataron como a un miembro más de su familia y estuvieron siempre al pendiente de lo que yo necesitase. Gracias por su cariño, hospitalidad y esfuerzo por estar siempre ahí para mí.

Agradezco también a César por sus exigencias que me supusieron retos que me permitieron llegar a cumplir con los objetivos establecidos de la tesis y ganar experiencia. Además, siempre me apoyó y en ocasiones me abrió los ojos con todo lo que necesitaba para llevar a cabo la tesis de manera adecuada.

Gracias a Manuel Recuero por su apoyo para la realización de este doctorado y por sus consejos ya que sin ellos no estaría donde estoy ahora.

Gracias al doctorando Luis Gascó por llevarme a las ubicaciones de medición cuando yo no podía conducir y por su ayuda sobre temas de investigación.

Gracias a todo el personal de I2A2 por el apoyo proporcionado, por haberme enseñado a utilizar herramientas acústicas y por el soporte técnico que me brindaron a lo largo de la tesis.

Gracias a los ayuntamientos de San Sebastián de los Reyes, Mejorada del Campo, Coslada y Algete por el apoyo brindado para llevar a cabo las mediciones y su interés por el tema.

Gracias a la sección de Medio Ambiente de San Sebastián de los Reyes por su amabilidad y comprensión cuando tuve que desplazarme a las ubicaciones de mediciones.

Gracias al personal de todos los inmuebles donde se llevaron a cabo las mediciones, los cuales se enuncian a continuación:

- CEIP San Esteban (Coslada, Madrid, España)
- Colegio Público Henares (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Pablo Picasso (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Jarama (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Europa (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Miguel de Cervantes (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Casa de la Cultura (Mejorada del Campo, Madrid, España)

- Biblioteca Municipal (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Viviendas (San Sebastián de los Reyes, Madrid, España)
- Viviendas (Algete, Madrid, España)
- Biblioteca SMS (Pisa, Italia)

Gracias al Consejo Nacional de Investigación de Pisa y a la Agencia de Protección Ambiental de la Toscana por su apoyo durante mi estancia doctoral. Especialmente al Profesor Gaetano Licitra, a todos los miembros del grupo IPOOL y al Doctor Paolo Gagliardi porque aparte de que gané experiencia, con su amistad y camaradería se hizo más llevadero el tiempo lejos de España.

Gracias también a Ignacio Pavón por su orientación y apoyo sobre temas administrativos, también por el conocimiento transmitido tanto en el Máster como en el Doctorado.

Gracias al Doctor Alejandro Ramos Amézquita por ponerme en contacto con la Universidad Politécnica de Madrid.

Gracias a todos los miembros de la Coral ITER por su apoyo en todos los aspectos, por su amistad y por ayudarme a desconectar cuando era necesario.

Finalmente quiero agradecer al CONACYT por el apoyo económico brindado a lo largo del doctorado ya que sin él no hubiese sido posible llevar a cabo esta tesis.

ÍNDICE

[illegible]

3.2 CUANTIFICACIÓN DE EFECTOS DE FACTORES DE INFLUENCIA SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE AVIACIÓN	69
3.2.1 Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos.....	69
3.2.2 Efectos del ángulo de <i>slant</i> γ sobre el factor de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2	76
4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES	83
4.1 CONCLUSIONES.....	83
4.2 APORTACIONES.....	86
4.2.1 ARTÍCULOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS	87
4.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	87
5. CONCLUSIONS AND CONTRIBUTIONS	89
5.1 CONCLUSIONS	89
5.2 CONTRIBUTIONS	92
5.2.1 ARTICLES IN JOURNALS	93
5.3 FUTURE RESEARCH TOPICS	93
6. BIBLIOGRAFÍA	95
7. ANEXOS	100
7.1 Análisis de ruido a lo largo de la fachada.....	100
7.1.1 Coslada	100
7.1.2 Mejorada del Campo	101
7.1.3 Pisa	102
7.2 Influencia de fachadas expuesta y sombra sobre el nivel de ruido en condiciones de referencia.....	103
7.2.1 Mejorada del Campo	103
7.2.2 Pisa	104
7.3 Efectos del ángulo de <i>slant</i> γ sobre la propagación del ruido de aviación	105
7.3.1 San Sebastián de los Reyes.....	105
7.3.2 Mejorada del Campo	106
7.3.3 Algete	107
7.3.4 Pisa	108
7.4 Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos.....	109
7.4.1 San Sebastián de los Reyes.....	109
7.4.2 Algete	110
7.4.3 Mejorada del Campo	111
7.4.4 Pisa	112
GLOSARIO DE TÉRMINOS	113
PUBLICACIONES	115

RESUMEN

El ruido de aviación constituye un problema importante para la salud de las personas y el medio ambiente. Algunos estudios realizados a individuos expuestos al ruido de aviación demuestran baja calidad de sueño, irritabilidad y una tendencia a la hipertensión. Además de los altos niveles de presión sonora, los aviones emiten gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y causan problemas respiratorios. Por todas estas razones, algunos organismos internacionales han mostrado su preocupación por el impacto medioambiental de las aeronaves y han desarrollado planes para reducirlo.

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) ha propuesto el denominado enfoque equilibrado. Dicho enfoque propone estrategias para la reducción de niveles de ruido de aviación que se agrupan en cuatro elementos: reducción del ruido en la fuente, administración y planeación del uso de suelo, procedimientos operacionales de abatimiento de ruido y restricciones en las operaciones de aeronaves. Entre las actuaciones necesarias para la gestión del ruido aeroportuario, deben realizarse la diagnosis y el control de los niveles sonoros emitidos por aeronaves. En los alrededores de los aeropuertos se han utilizado herramientas como estaciones de monitorizado. Estos sistemas de medida tienen por objeto informar a la población para realizar un control de las emisiones de ruido aeroportuario.

Además de las mediciones, existen modelos matemáticos que permiten diagnosticar el impacto del ruido aeroportuario en una región durante un período de tiempo. AEDT 2b es un ejemplo de modelo de predicción de ruido de aviación. Dicho modelo considera la atenuación atmosférica y topografía de una zona geográfica para predecir los niveles de ruido aeroportuario. Estas herramientas son fundamentales para llevar a cabo estudios que permitan delimitar zonas de servidumbre de un aeropuerto o para pronosticar los niveles de ruido a corto, mediano y largo plazo en una región. Sin embargo, la mayoría de los modelos actualmente existentes realizan predicciones considerando elementos básicos de propagación. Muchos de ellos no consideran variables como edificios, calles y parques que modifican la geometría fuente-receptor y están presentes en muchas ciudades.

Para medir el ruido de aviación es necesario contar con una posición de referencia que permita realizar estudios comparables y consistentes. Dicha referencia debe estar lejos de fachadas u otros elementos reflectantes. No obstante, no siempre es posible encontrar una referencia adecuada. Esto se debe a que en los entornos urbanos existen elementos que modifican la propagación del ruido de aviación. Estos elementos constituyen formas urbanas, agentes y procesos que se transforman en

una ciudad. Dichos agentes no son considerados en los modelos e inducen fenómenos de onda que cambian la propagación del ruido de aviación. Al estudio de estos agentes, se le conoce como morfología urbana.

Uno de los objetivos que tiene esta tesis es mejorar los modelos de propagación del ruido de aeronaves en entornos urbanos. Para lograr dicho objetivo, primero se identifica qué variables de la morfología urbana son significativas en la propagación del ruido de aviación. Variables como la topología de calle (U o L), el ángulo de vista β y factores operativos intervienen en la propagación del ruido de aviación. Mediante un análisis del cambio en los niveles de ruido se determina si dichas variables son significativas en la propagación del ruido de aviación. Una vez identificados los factores significativos se determina en qué grado modifican los niveles de ruido en fachada.

Los niveles de ruido en el interior de inmueble son de interés por los efectos negativos que tienen en la salud. Sin embargo, es complicado medir por largos períodos de tiempo en el interior de un edificio. Por ello, el nivel de ruido en el interior de un edificio se calcula con el nivel de ruido en fachada considerando el área de la fachada y el volumen del recinto. En esta tesis se propone un cálculo mejorado del nivel de ruido en fachada con el fin de obtener el nivel de ruido en el interior de un edificio con mayor precisión. De cara a un futuro, se espera que con la metodología propuesta en esta tesis se pueda realizar un modelado más riguroso al incorporar más variables como la altura de las fachadas y el material de las paredes y el suelo. El trabajo realizado con esta tesis supone un avance porque además de proporcionar información sobre el ruido de aviación en condiciones de referencia, se cuantifica el impacto de elementos de la morfología urbana sobre el nivel de ruido en fachada.

PALABRAS CLAVE: Ruido de aviación, ruido urbano, monitorizado de ruido, ángulo de vista, morfología urbana, aislamiento acústico de fachadas, simulación de ruido aeroportuario.

ABSTRACT

Aircraft noise represents an important problem for human health and the environment because of the high sound pressure levels generated. Some studies made to the population exposed to aircraft noise show low sleep quality, irritability and a tendency to hypertension. Apart from the noise emissions, aircraft also produce greenhouse effect gases which contribute to global warming and cause respiratory problems. All these drawbacks have raised the concern of international organizations and they have developed strategies to reduce aircraft noise.

The International Civil Aviation Organization has proposed a balanced approach with the intention of mitigating the sound pressure levels produced by aircraft. This approach encourages the development of policies focused on four main elements: the reduction of noise at source, land-use planning and management, noise abatement operational procedures and operating restrictions on aircraft. It is necessary to perform the diagnosis of the sound pressure levels. Therefore, tools like Noise Monitoring Terminals have been installed in airports surroundings. Those terminals intend to inform the population in order to perform a noise emission control of the sound pressure levels caused by aircraft.

Apart from the measurements, there are mathematical models that allow diagnosing the impact of aircraft noise in a region over a period of time. AEDT 2b is an example of an aircraft noise prediction model. This model considers atmospheric attenuation and the topography of a geographical zone for predicting airport noise. These tools are basic for performing studies that may allow establishing working areas of an airport or to forecast the noise levels in short, mid and long term over time. However, the majority of the current models perform predictions by taking into consideration basic propagation elements. Most models do not consider variables like buildings, streets and parks which modify source-receiver geometry and are present in many cities.

For measuring aircraft noise, a reference position is necessary so that studies may be consistent and comparable. This reference position must be located away from façades or reflecting elements. Nevertheless, it is not always possible to find an appropriate reference position. This happens because in urban areas there are elements that modify aircraft noise propagation. These elements constitute urban forms, agents and processes that are transforming in a city. Those agents are not considered in propagation models and induce wave phenomena that modify aircraft noise propagation. The study of all these agents is called urban morphology.

One of the goals of this thesis is to improve the aircraft noise propagation models in urban areas. To accomplish that goal, first the significant variables are identified in aircraft noise propagation. Factors like Street topology (U or L), the line of sight angle β , and operational factors are involved in aircraft noise propagation. Through an analysis of the noise variations it is determined if those variables are significant in aircraft noise propagation. Once those factors are identified, it is determined the extent to which they modify the façade noise levels.

The noise levels on the inside of a building are of interest because of the negative effects they have on health. However, it is complicated to perform measurements during long periods of time on the inside of a building. Therefore, the noise level on the inside of a building is calculated with the noise level on façade by considering its area and the volume of the room. In this dissertation, an enhanced calculation of the noise level on façade is proposed with the aim of obtaining noise levels on the inside of a building with greater precision. On the long run, with this methodology developed it is expected to allow devising a more precise model by taking into consideration more variables like façade height and the wall and ground materials. The work performed in this dissertation represents progress in this field of study because apart from providing information about aircraft noise in reference conditions, the impact of urban morphology elements on façade noise is quantified.

KEYWORDS: Aircraft noise, U and L shaped streets, urban noise, noise monitoring, Line of sight angle.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de contorno de ruido.....	7
Figura 2. Apantallamiento acústico.....	11
Figura 3. Reflexión acústica.....	12
Figura 4. Difracción acústica	12
Figura 5. Difracción acústica para ruido de tráfico	13
Figura 6. Apantallamiento acústico para ruido de tráfico	13
Figura 7. Propagación de ruido de aviación vs ruido de tráfico	15
Figura 8. Ejemplos de transmisión directa y apantallamiento de ruido de aviación.	16
Figura 9. Ejemplos de transmisión de ruido de aviación en presencia y ausencia de superficies reflectantes	16
Figura 10. Escenarios de fachadas para ΔL_{fs}	24
Figura 11. Geometría fuente-receptor de estación de monitorizado de ruido de aviación.	25
Figura 12. Posición de referencia.....	27
Figura 13. Posición con micrófono directamente sobre la superficie reflectante.....	27
Figura 14. Posición del micrófono cerca de una superficie reflectante.....	28
Figura 15. Incidencia de ruido de aviación en posiciones de fachada y referencia.....	29
Figura 16. Ejemplo de fachadas expuestas y sombra.	30
Figura 17. Formación de ángulos de vista 2D.....	32
Figura 18. Formación de ángulos de vista 3D.....	33
Figura 19. Topologías de calle U y L.....	34
Figura 20. Ángulo de <i>slant</i>	35
Figura 21. Posiciones de micrófonos de referencia y fachada	39
Figura 22. Ejemplo de micrófono de referencia.....	39
Figura 23. Configuración de los micrófonos de fachada a 1,5m y 4,0-6,6 m sobre el suelo	39
Figura 24. Fachadas de un edificio con diversidad de ángulos de vista β observados desde planta (izquierda) y alzado (derecha).....	41
Figura 25. Topologías U y L con transmisiones directa e indirecta.....	41
Figura 26. Vuelos con distintos ángulos de <i>slant</i>	42
Figura 27. Trayectorias de vuelo de aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas y ubicaciones para la primera campaña de mediciones	45
Figura 28. Trayectorias de vuelo de aeropuerto Galileo Galilei y ubicación para la primera campaña de mediciones.....	45
Figura 29. Trayectorias de vuelo de aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas y ubicaciones para la segunda campaña de mediciones.....	46
Figura 30. Esquema de adquisición de datos.	47
Figura 31. Ángulos de vista β obtenidos.....	48
Figura 32. Ángulo de vista modificado por topología U.....	49
Figura 33. Ángulo de vista β modificado por altitud en topología U.	49
Figura 34. Transmisión de ruido de aviación a 45°	50
Figura 35. Captura de pantalla de base de datos de eventos de ruido.	56
Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes de niveles $L_{AE\ fachada i}$ por ciudad de la primera campaña de mediciones.....	58

Figura 37. Histograma de valores totales de $L_{AE\ fachadai}$ de la primera campaña de mediciones ..	58
Figura 38. Diagrama de cajas y bigotes de $L_{AE\ fachadai}$ por ciudad en la segunda campaña de mediciones.....	60
Figura 39. Histograma de $L_{AE\ fachadai}$ total para segunda campaña de mediciones	60
Figura 40. Histograma de $L_{AE\ fachadai}$ totales de análisis de variaciones a lo largo de la fachada.	62
Figura 41. Diagrama de cajas y bigotes de $L_{AE\ fachadai}$ total a lo largo de la fachada.	63
Figura 42. Posiciones en fachada en edificios de Madrid (izquierda) y Pisa (derecha).....	64
Figura 43. Histograma de $L_{AE\ fachadai}$ total para análisis de influencia de posición de fachada. ...	68
Figura 44. $L_{AE\ fachadai}$ vs $L_{AE\ referencial}$	73
Figura 45. Histograma de residuos para modelo de propagación de ruido en entornos urbanos.	74
Figura 46. Residuos estandarizados vs residuos predichos de modelo de propagación de ruido en entornos urbanos.	74
Figura 47. Valores predichos y observados de $L_{AE\ fachadai}$	76
Figura 48. $L_{AE\ referencial}$ vs $L_{AE\ fachadai}$	80
Figura 49. Histograma de residuos calculados para modelo de influencia de ángulo de <i>slant</i> sobre $L_{AE\ fachadai}$	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachadai}$ por ciudad en la primera campaña	59
Tabla 2. Percentiles de $L_{AE\ fachadai}$ por ciudad en la primera campaña	59
Tabla 3. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachadai}$ por ciudad para segunda campana de mediciones	61
Tabla 4. Percentiles de $L_{AE\ fachadai}$ por ciudad para segunda campaña de mediciones	61
Tabla 5. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachadai}$ para análisis de variaciones a lo largo de la fachada	62
Tabla 6. Estadísticos descriptivos de cada edificio medido	64
Tabla 7. Medias y desviaciones estándar de topología y ángulo de vista	65
Tabla 8. Contrastes de hipótesis entre topologías y ángulos de vista.....	66
Tabla 9. Estadísticos descriptivos de eventos medidos en fachada y referencia.....	71
Tabla 10. Tabla de correlaciones de Pearson para modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos	72
Tabla 11. Coeficientes de modelo y contrastes	75
Tabla 12. Estadísticos descriptivos de eventos medidos en fachada y referencia.....	79
Tabla 13. Correlaciones de Pearson para modelo de influencia de ángulo de <i>slant</i> sobre $L_{AE\ fachadai}$	80
Tabla 14. Coeficientes de modelo con sus niveles de significación.....	82

1. INTRODUCCIÓN

1.1 RUIDO AEROPORTUARIO

1.1.1 Impacto del ruido de aviación sobre la salud de las personas

El transporte aéreo es de gran importancia en el desarrollo de un país por tratarse de un medio de transporte de larga distancia [1]. En el Libro Blanco de Transporte (2011) se indica que el transporte internacional es fundamental porque permite la apertura de los mercados de servicios y productos, así como inversiones en el sector de los transportes de países terceros. Ejemplo de esto lo constituye un objetivo de la Unión Europea llamado Zona Europea Común de Aviación, en la que intervienen 58 países y 1000 millones de habitantes. Este proyecto se está llevando a cabo para celebrar acuerdos globales de servicios aéreos con los principales socios económicos y eliminar las restricciones a la inversión en transporte aéreo en países terceros [2]. Proyectos como éste son una prueba de que la industria del transporte aéreo tiene impacto positivo en la asignación de recursos y sirve como catalizador en el desarrollo industrial, especialmente mediante la explotación de recursos humanos y naturales de una región específica [3].

En los últimos años, los aeropuertos de grandes metrópolis han estado experimentando una demanda creciente. De acuerdo con AIRBUS (2017), actualmente existen alrededor de 47 megaciudades, dichas ciudades cuentan con aeropuertos donde el 90% de sus vuelos son transcontinentales y transportan alrededor de un millón de pasajeros diarios. De esas 47 ciudades hay 39 que experimentan congestión tanto a nivel operativo como a nivel ambiental. Además, se espera durante los próximos veinte años un incremento anual del 4,4% del tráfico aéreo global [4]. Estas estadísticas, indican una gran demanda por los servicios de un aeropuerto y también un reto ya que se deben cubrir las necesidades de la sociedad y cumplir con los límites ambientales permitidos.

Cada aeropuerto tiene sus capacidades determinadas según el tipo de vuelos que opere, la ciudad donde se encuentre y su ubicación dentro de dicha ciudad. De acuerdo con Attenborough, K *et al* (2011) “la capacidad de un aeropuerto está definida en los niveles operativo, de seguridad de sus vuelos, económico y ambiental” [5]. Por lo tanto, una razón por la que la capacidad operativa de un aeropuerto se ve limitada, es su impacto en el ambiente. El impacto de un aeropuerto sobre el ambiente receptor compromete su capacidad ambiental y con ello, su capacidad de navegación aérea. Los aviones tienen un amplio impacto en el medio ambiente porque emiten gases de efecto invernadero que afectan a la salud de la gente y contribuyen al cambio climático además de generar ruido.

Upham et al (2003) confirman que los aeropuertos contribuyen de manera significativa al cambio climático, a la contaminación acústica y a la contaminación atmosférica [6]. El motor de un avión emite gases como dióxido de carbono (CO_2), vapor de agua (H_2O) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Se ha encontrado que las emisiones de dichos gases provocan diversos problemas en la gente expuesta de manera crónica, principalmente respiratorios [7]. La Organización de Aviación Civil Internacional en su asamblea 38 (2014), planteó algunos objetivos respecto a la protección del medio ambiente a través de metas de reducción de emisión de gases de efecto invernadero. Dichos objetivos consisten en reducir las emisiones de CO_2 en un 1,5% anual de 2009 a 2020 con la intención de lograr un 50% para 2050 en comparación con los niveles de 2005 [8].

Además de los contaminantes que generan los aviones, el ruido es probablemente el problema que más rechazo provoca de los aeropuertos por parte de las poblaciones cercanas. El ruido de aviación tiene efectos negativos sobre la salud ya que la exposición a altos niveles de ruido puede resultar en perturbación de sueño, irritabilidad y baja productividad laboral. De acuerdo con las Pautas de Ruido Nocturno para Europa de la Organización Mundial de la Salud (2009), “un desorden ambiental de sueño es una perturbación provocada por un factor ambiental que ocasiona quejas ya sean de insomnio, somnolencia o fatiga durante el día”. El ruido de aviación constituye un desorden ambiental del sueño y esto tiene efectos negativos sobre la calidad de vida y salud pública. Algunos estudios muestran que la perturbación del sueño provoca cambios en el comportamiento de la gente, lo cual es notado en diversos aspectos como en el aprendizaje de una determinada tarea. Esto se debe a que cuando el ciclo de sueño es perturbado, los patrones de conectividad entre ciertas regiones del cerebro son alterados. Estas perturbaciones son examinadas mediante un electroencefalograma y son llamadas despertares. En el caso del ruido de aviación, algunos reportes muestran que la cantidad de despertares incrementa cuando un evento de ruido de aviación está presente [9].

En otro estudio llevado a cabo por Janssen, S.A. *et al* (2014), se evaluó el efecto del número de eventos de ruido de aviación en la calidad del sueño. Esto se hizo a través de un sensor que medía las capacidades motrices de los participantes en el estudio después de estar expuestos a eventos de ruido de aviación durante la noche. Se llevó a cabo un modelo de regresión lineal que incluía como variables independientes el número de eventos, el nivel de ruido y el tiempo en el que ocurrían los eventos estableciendo como variable dependiente a la motilidad. Mediante este estudio se observó que no era el número total de eventos de ruido de aviación el que tenía un impacto directo en la motilidad, sino el número de eventos con niveles superiores a 60 dBA [10]. A través de este estudio

se comprueba que la cantidad de eventos con altos niveles de presión sonora afecta a un individuo al perturbar su sueño perjudicando sus capacidades motrices durante el día.

En una ciudad existen fuentes de ruido que ocasionan molestias y problemas en la salud de las personas expuestas. Estudios llevados a cabo por la Organización Mundial de la Salud, muestran una serie de asociaciones estadísticamente significativas entre la exposición a niveles de ruido exterior superiores a +50 dBA y enfermedades cardiovasculares, respiratorias y artritis. Además, dichos estudios indican que en un entorno urbano las fuentes de ruido externas que más molestias generan son el tráfico rodado, los aviones, la industria y las obras públicas [11, 12].

Diversos estudios demuestran que el ruido de aviación es un estímulo inesperado que conlleva una serie de respuestas somáticas como la constricción periférica de los vasos sanguíneos, pequeños cambios en el ritmo cardíaco y un aumento del flujo sanguíneo cerebral [13]. De acuerdo con Swift, H (2010), además de la perturbación del sueño, hay cambios en la presión sanguínea y aumentos en el ritmo cardíaco. Estos cambios han sido observados a corto plazo, sin embargo, la exposición periódica a estos eventos puede degenerar en una mayor propensión a infartos o enfermedades cardiovasculares [14].

La presencia del ruido genera molestias en los individuos expuestos. Dichas molestias se suelen manifestar de distintas maneras en cada período de una jornada. Durante la noche, el ruido genera perturbaciones del sueño que modifican su ciclo y provocan insomnio. Estudios de pacientes con insomnio muestran que la gente con baja calidad de sueño tiene más posibilidades de contraer problemas del corazón como infartos o muerte cardíaca. En estudios realizados a individuos viviendo cerca de los aeropuertos de Schiphol y Colonia, en Holanda y Alemania respectivamente, se observó una gran cantidad de prescripciones de medicamentos cardiovasculares. Esto muestra que los individuos con exposición crónica al ruido de aviación poseen una tendencia al padecimiento de problemas cardiovasculares [15].

De acuerdo con los estudios y datos citados anteriormente, los aviones provocan muchos inconvenientes en la salud de las personas tanto por el ruido que generan como por las sustancias tóxicas que emiten. Para poder mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero, se están desarrollando políticas públicas y metas a cumplir para que año con año las emisiones disminuyan. Mientras que para reducir los niveles de inmisión provocados por el ruido de aviación, se están implementando prácticas y objetivos principalmente diseñados por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Dentro del ámbito de la investigación, se han estudiado factores que

modifican los niveles de inmisión para contribuir al desarrollo de técnicas que permitan disminuir los niveles de ruido de aviación, mismas que se muestran en los siguientes apartados.

1.1.2 Niveles de inmisión provocados por el ruido de aviación

El ruido es definido como un sonido no deseado. Esto implica que el receptor que percibe el sonido hace un juicio basado en un número de factores para decidir si lo que escucha no es deseado. El juicio puede hacerse porque el sonido sea muy alto, molesto o porque tenga una baja calidad. Dependiendo del contexto en el que el ruido sea producido el receptor puede llegar a aceptar el ruido aún si es dañino para la salud. Sin embargo, el concepto de sonido no deseado indica que se desean mitigar los niveles de ruido [16]. En el caso particular de los entornos urbanos existe una gran cantidad de fuentes sonoras que generan altos niveles de ruido.

Al efectuar un análisis de la propagación sonora en el medio exterior, podemos distinguir tres elementos básicos: emisor, receptor y el camino de propagación. El sonido siempre es producido por un emisor con características como directividad, contenido espectral, y potencia. De acuerdo con Möser *et al* (2013), los niveles de ruido medidos con ponderación A L_{Aeq} emitidos por una fuente de ruido y en condiciones donde la cantidad de obstáculos y superficies reflectantes es mínima, son llamados niveles de emisión. Cuando las ondas producidas por dicha fuente llegan a un receptor bajo condiciones ambientales estándar habrá pérdidas a lo largo del camino de propagación. Por lo tanto, el nivel de ruido registrado en el receptor se desvía significativamente del nivel de emisión y es llamado nivel de inmisión [17].

En un entorno urbano existe una gran variedad de fuentes sonoras que pueden producir distintos niveles de emisión que al propagarse en un entorno urbano son modificados. El conjunto de todos ellos proporciona altos niveles de inmisión. Recuero (2000) menciona que para combatir el grado de contaminación acústica presente en los grandes centros de población, se deben estudiar y conocer con profundidad las fuentes sonoras y sus características físicas como paso previo para disminuir los niveles de ruido que generan y así proteger a las personas [18]. Por ello, las fuentes de ruido más importantes que están presentes en los centros poblacionales se pueden dividir en dos grupos grandes:

- Fuentes de ruido internas a la edificación: El ruido provocado por estas fuentes se debe al empleo de los edificios, así como a sus servicios e instalaciones.
- Fuentes de ruido externas a la edificación: El ruido provocado por estas fuentes es causado por eventos que suceden en el exterior de los edificios.

Por los efectos que el ruido tiene sobre la salud y el medio ambiente, administraciones públicas y distintos organismos internacionales han desarrollado estrategias para mitigar los altos niveles de presión sonora. Por ejemplo, en España existe un requisito básico que deben de cumplir todos los edificios dentro del Código Técnico de la Edificación. Dicho requisito establece el aislamiento que deben tener los edificios para reducir los niveles de ruido en su interior. Para el cumplimiento de este requisito de manera adecuada, se ha redactado una guía cuyo nombre es Documento Básico de Protección Frente al Ruido DB HR (2009) [19]. En dicho documento, se establece el aislamiento que deben tener los edificios según su propósito frente a los niveles de ruido medidos durante el día (L_d), tarde (L_e) y noche (L_n).

Por su parte, algunos organismos internacionales como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) han elaborado estrategias aplicables para fuentes externas determinadas. OACI (2008) ha propuesto una serie de estrategias para combatir el ruido aeroportuario llamada enfoque equilibrado. Con el enfoque equilibrado se pretende minimizar los niveles de ruido de aviación en zonas aledañas a los aeropuertos al centrarse en cuatro elementos principales. Estos elementos son la reducción del ruido en la fuente, la planeación y administración del uso de suelo, los procedimientos operacionales de abatimiento de ruido y las restricciones en la operación de aeronaves [20]. A continuación, se muestran una serie de medidas que deben ser aplicadas en cada uno de los elementos del enfoque equilibrado que en conjunto garantizan una reducción de los niveles de ruido de un aeropuerto.

El primer elemento del enfoque equilibrado consiste en la reducción del ruido en la fuente, lo cual se traduce en la fabricación de aviones más silenciosos. Para alcanzar dicho objetivo, se pretende elaborar normas de ruido de aviación en las que se exija a los fabricantes contar con la tecnología más actual para reducir los niveles de presión sonora que producen los aviones. De esta manera, se persigue una modernización de flotas para las aerolíneas que operan en un aeropuerto determinado. Dichas normas también deben exigir planes nacionales de reducción de ruido y la adopción de las más recientes recomendaciones de OACI.

El segundo elemento es la planeación del uso del suelo, dicho elemento se enfoca en dirigir lejos de un aeropuerto todo el territorio incompatible con las actividades aeroportuarias. Es decir, al construir un nuevo aeropuerto es necesario buscar una zona que se encuentre lo más alejada posible de zonas sensibles al ruido de aviación (locaciones con edificios de uso residencial, educativo, sanitario etc.). Así también, es importante buscar que las construcciones nuevas no se realicen cerca de un aeropuerto. Además, se deben tomar las medidas adecuadas para la planeación del uso del suelo desde la etapa inicial de construcción de un aeropuerto nuevo o durante las ampliaciones de

un aeropuerto existente. Cabe mencionar, que es preciso promulgar políticas públicas para hacer un uso adecuado del suelo y difundir información sobre los efectos ambientales del ruido de aviación.

El tercer elemento del enfoque equilibrado se refiere a los procedimientos operacionales para el abatimiento del ruido de aviación. Dichos procedimientos deben ser regulados de distintas maneras, una de ellas es mediante el énfasis del uso preferente de pistas para dirigir las trayectorias de vuelo lejos de zonas habitadas sensibles al ruido. También es importante establecer rutas preferentes para evitar áreas sensibles al ruido de despegues y aterrizajes. En dichas rutas puede ser necesario incluir vueltas para alejar los aviones de zonas sensibles al ruido localizadas debajo o adyacentemente de las trayectorias de vuelo usuales.

El cuarto y último elemento del enfoque equilibrado propuesto por la OACI consiste en restricciones de operaciones. La restricción de operaciones es definida como cualquier acción relacionada con el ruido que limite o reduzca el acceso de una aeronave a un aeropuerto. Dichas restricciones se clasifican en cuatro tipos: globales, de aeronaves específicas, parciales y progresivas. Las restricciones globales se aplican para todo el tráfico del aeropuerto y se basan en el desempeño de la flota total. Las restricciones de aeronaves específicas se refieren a una aeronave o grupo de aeronaves basadas en el desempeño de ruido individual. Las restricciones parciales se imparten para un período de tiempo identificado durante una jornada, días determinados de la semana o solo para ciertas pistas en el aeropuerto. Y las restricciones progresivas son aquellas que pretenden un decremento gradual del máximo nivel de tráfico o energía de ruido sobre un período determinado de tiempo, mismo que suele ser un número de años antes de llegar al nivel final.

Con el fin de cumplir con lo que indica el enfoque equilibrado se han implementado prácticas operacionales en diversos aeropuertos del mundo. Mediante múltiples estudios e investigaciones se ha buscado si hay más elementos además de los mencionados en el enfoque equilibrado, que ayuden a mitigar el ruido aeroportuario. En diversos estudios, se ha evaluado la efectividad de la correcta aplicación de medidas sobre los elementos del enfoque equilibrado y se ha observado que en general produce resultados satisfactorios [21, 22, 23, 24, 25].

Para llevar a cabo las medidas especificadas en el enfoque equilibrado, también se enfatiza la identificación del problema en el aeropuerto. Mediante la difusión de los niveles de ruido producidos se informa a la gente para identificar la magnitud del problema y observar las molestias ocasionadas. Gascó *et al* (2017) analizaron los actuales medios utilizados por los aeropuertos alrededor del mundo para difundir los niveles de ruido que producen. En cada país se utilizan distintos medios de difusión de los niveles de presión sonora producidos en una comunidad. Sin

embargo, dicha información posee inconvenientes como la falta de estandarización de los índices utilizados y la redacción excesivamente técnica para el público general. Otro problema de las actuales técnicas de monitorizado de ruido de aviación es que la instalación de estaciones es costosa y por ello, no se puede realizar un amplio despliegue. Como las mediciones son realizadas en posiciones que pretenden describir la inmisión en determinadas áreas, esto supone que los afectados lo consideren poco representativo de la afección en su propia vivienda [26].

Otra forma de identificar el problema del ruido aeroportuario es mediante su modelización y eso se hace con el cálculo de contornos de ruido. Con el uso de herramientas informáticas se pronostican los niveles de ruido que se percibirán en vecindarios cercanos a aeropuertos y aquellos a los que están expuestas las zonas acústicamente sensibles. Estos cálculos se hacen con el fin de diseñar estrategias que permitan establecer límites de ruido a los que se pretenda llegar en un período de tiempo. El Documento 9911 de la OACI (2008), define los contornos de ruido como una representación gráfica del valor de un índice de ruido de aviación en los alrededores de un aeropuerto. Dicho documento proporciona instrucciones para calcular los niveles de ruido y la producción de contornos de ruido de aviación [27]. Los contornos de ruido se usan para la evaluación del impacto ambiental de un aeropuerto o de un cambio que sufra el mismo sobre vecindarios locales. Es decir, el cálculo de contornos de ruido permite obtener los niveles de presión sonora a los que está expuesta una comunidad aledaña a un aeropuerto y evaluar el impacto medioambiental que tendrá la modificación de la infraestructura aeroportuaria o de algún factor operacional en alguna de sus pistas. En la Figura 1 se puede observar un ejemplo del contorno de ruido generado por un aeropuerto.

Figura 1. Ejemplo de contorno de ruido

Los modelos de ruido de aviación tienen por objeto calcular los niveles de ruido provocados en una zona por un aeropuerto. Las predicciones de ruido son utilizadas actualmente como herramientas de planeación, evaluación y como una componente de esfuerzos de largo alcance por parte de autoridades locales, regionales o nacionales para minimizar reacciones adversas al ruido

producido por una aeronave durante un despegue o un aterrizaje. Los modelos han sido implementados en aplicaciones informáticas capaces de predecir los niveles de presión sonora en sitios cercanos a un aeropuerto.

Los niveles de ruido son calculados a partir de modelos estadísticos que describen el desempeño de los aviones individuales para condiciones atmosféricas dadas con elementos básicos de propagación. Las condiciones de ruido son definidas mediante las tasas de atenuación atmosférica, y se usan datos de ruido anuales promedio de los aeropuertos más grandes del mundo. Dado que los contornos de ruido calculados muestran condiciones promedio sobre largos períodos de tiempo, se aplican datos de temperatura atmosférica y humedad constantes durante todo el tiempo especificado.

Los modelos de ruido de aviación funcionan a partir de datos de entrada que describen la situación actual de un aeropuerto, como sus pistas, trayectorias, número de operaciones y tráfico aéreo actual. A partir de dichos datos, los modelos proporcionan niveles de ruido de alguna métrica predefinida. Los datos de entrada se refieren a una descripción detallada de sus pistas de vuelo y al número de movimientos de una aeronave particular o distintas categorías durante determinados períodos de tiempo. A partir de esta información de entrada, se calculan los niveles de ruido que serán producidos por un aeropuerto en zonas cercanas.

Los niveles de ruido producidos por un evento de aviación son calculados mediante la suma de los niveles de presión sonora de cada segmento de una ruta de vuelo. De acuerdo con el Documento 29 (2005) de la Conferencia Europea de Aviación Civil (ECAC por sus siglas en inglés), existen tres enfoques distintos para realizar los cálculos de los niveles de ruido a lo largo de una ruta de vuelo [28]. Los cuales son:

- a. Punto más cercano de enfoque: es el algoritmo más sencillo y veloz. Este algoritmo se basa en la suposición de que para unas características de fuente dadas, el máximo nivel de ruido de un evento L_{max} depende únicamente de la distancia más corta entre fuente y receptor. El punto más cercano de enfoque divide a una trayectoria de vuelo en diversos segmentos. La distancia desde el observador hasta el punto más cercano de enfoque y L_{max} son calculados mediante geometría de coordenadas. Sin embargo, para estimar el nivel de exposición sonora L_E , una parte extendida del vuelo debe ser tomada en cuenta. Los modelos de punto más cercano de enfoque tienden a usar curvas ruido-potencia-distancia (NPD por sus siglas en inglés) que son almacenadas para segmentos infinitos de línea y velocidades específicas de aeronaves.

- b. Segmentación: es una extensión de algoritmos del punto más cercano de enfoque. Estos algoritmos calculan las contribuciones separadas a L_E de cada segmento significativamente ruidoso de la trayectoria de vuelo. Para cada segmento, a partir de los datos ruido-potencia-distancia, se calcula cuál es la fracción del segmento infinito de ruido que es radiada desde el segmento finito. Todos los segmentos son rectos y los segmentos circulares son descritos mediante una sucesión de segmentos rectos. Sin embargo, con los modelos de segmentación, se deben introducir las características direccionales de radiación del ruido de aviación.
- c. Simulación: describe las emisiones sonoras de trayectorias de vuelo reales de una aeronave a través de una serie de puntos discretos en el espacio que son cruzados después de pequeños intervalos sucesivos de tiempo. El historial de los niveles en el tiempo en cualquier posición receptora es construido a través del cálculo del sonido radiado hacia el receptor desde cualquier punto de la trayectoria de vuelo. Sin embargo, el modelado mediante simulaciones tiene dos desventajas: la alta demanda de tiempo y potencia de procesado y la necesidad de datos acústicos de entrada muy detallados incluyendo información de las características tridimensionales de la fuente de ruido como una función de la frecuencia y configuración del vuelo.

Un ejemplo de modelos de ruido de aviación lo constituye AEDT 2b, que es un paquete de software que simula el desempeño de los aviones en tiempo y espacio para calcular ruido, consumo de combustible e impacto sobre la calidad del aire. Este modelo permite, desde estimar información sobre la propagación del ruido en zonas cercanas a aeropuertos provocadas por un solo vuelo, hasta obtener información a nivel regional, nacional y global. Esta herramienta permite determinar el impacto de los aeropuertos sobre regiones cercanas [29]. Otro modelo de predicción de ruido de aviación es FLULA2, mismo que lleva a cabo simulaciones basadas en mediciones reales bajo operaciones de tráfico aéreo. En sus cálculos, FLULA2 incorpora una fuente puntual con características de emisión sonora directivas que se mueve paso a paso a lo largo de una trayectoria de vuelo. Los puntos de recepción deseados son ordenados en un gradiente, y para cada posición discreta de la trayectoria, se calcula el nivel de presión sonora instantáneo. Los niveles de presión sonora provocados por el ruido de aviación cambian en función de elementos que amplifican la cantidad de dBA producidos por una fuente de ruido [30]. AEDT 2b considera factores como la distancia fuente-receptor y fenómenos de onda que se hacen presentes durante la propagación del ruido. FLULA2 por su parte, considera factores propios de los aviones, tales como su directividad y se basa en mediciones reales.

Las simulaciones se utilizan entre otras cosas para llevar a cabo mapas estratégicos de ruido según lo establecido en la Directiva 2002/49/CE. Dichos mapas se usan para evaluar globalmente la exposición al ruido en una zona determinada debida a la existencia de distintas fuentes de ruido, o para poder realizar predicciones globales en dicha zona [31]. Una vez que son llevados a cabo dichos mapas, se realizan planes de aislamiento acústico en los alrededores de los aeropuertos para minimizar las molestias ocasionadas por el ruido producido por diversas operaciones de las aeronaves [32]. No obstante, una limitación que poseen modelos como AEDT 2b y FLULA2 es que únicamente simulan la propagación de ruido sobre terrenos planos. Por consiguiente, al no considerar variables como edificios o calles, los niveles que calculan estos modelos son aquellos en condiciones de referencia, es decir, en una situación sin reflexiones.

El ruido de aviación cuenta con variables operativas que modifican la propagación de las ondas sonoras emitidas por una aeronave. Estas variables se refieren a características del tráfico aéreo como la composición de la flota, la intensidad de los vuelos y los procedimientos de vuelos para ciertos tipos de aeronaves individuales a lo largo de rutas separadas. Determinados vuelos requieren de ciertas maniobras para llevarse a cabo de una manera segura. Distintos procedimientos operativos producen diferentes niveles de presión sonora afectando a las inmediaciones de un aeropuerto. Por eso, se han realizado estudios sobre cómo estas variables influyen en los niveles de ruido y maneras en las que pueden ser mitigados.

En un estudio realizado por Gagliardi *et al* (2018), se determinó la influencia de variables operativas en el nivel de inmisión producido a través de un modelo de Regresión Lineal Múltiple. La altitud, la velocidad de arranque de las aeronaves, el peso bruto al momento del despegue, la velocidad del viento, la densidad del aire y su temperatura fueron introducidas como variables independientes. Mientras que el nivel de exposición sonora de los eventos de ruido de aviación fue introducido como la variable dependiente. A través de mediciones llevadas a cabo en el aeropuerto de Pisa Galileo Galilei se obtuvo un modelo. Este modelo fue calculado y validado a través de dos conjuntos de datos tomados en momentos distintos. Dicho modelo explica el 77% de la varianza de los datos y es una prueba de que hay variables operativas y climáticas que modifican los niveles de ruido de aviación en un despegue [33].

Como se observa en los estudios citados anteriormente, el ruido de aviación es complejo debido a que existen muchas variables propias de los aviones que modifican los niveles de presión sonora. Por eso es necesario poner en práctica las recomendaciones del enfoque equilibrado propuesto por ICAO. Sin embargo, además de las características intrínsecas de la fuente, existen otros factores

presentes en el camino de propagación que modifican los niveles de ruido producidos. Dichas variables son mencionadas en el siguiente apartado: 1.1.3 Propagación del ruido de aeropuertos.

1.1.3 Propagación del ruido de aeropuertos

La transmisión entre fuente y receptor es directa cuando en el camino de la propagación de las ondas no hay obstáculos. Cuando esto se cumple, se tiene línea de vista entre fuente y receptor. Cuando dicha propagación se da en el exterior, existen aún más variables que la modifican. De acuerdo con la norma ISO 9613-2 (1996) la propagación del ruido en el exterior se verá modificada por diversos elementos. Entre los elementos que ocasionan atenuación de los niveles de ruido producidos en exteriores se encuentran la divergencia geométrica, el apantallamiento y las reflexiones [34].

Cuando hay obstáculos presentes en la propagación de las ondas, se produce el fenómeno de apantallamiento acústico. Como se observa en la Figura 2, dicho fenómeno se refiere al bloqueo de la línea de vista y con ello se da una atenuación de los niveles de presión sonora. Además del apantallamiento acústico, las reflexiones constituyen otro fenómeno presente en la propagación de ruido. Las reflexiones se muestran en la Figura 3 y se dan cuando una onda sonora incide sobre una superficie plana cuyo tamaño es mayor a la longitud de onda del sonido incidente. Este fenómeno provoca interferencias destructivas o constructivas cuando las ondas incidentes se encuentran con las reflejadas. Otro fenómeno acústico que se presenta con la propagación del ruido es la difracción. Como se observa en la Figura 4, este fenómeno consiste en el cambio de la dirección de una onda sonora cuando se propaga a través o alrededor de barreras.

Figura 2. Apantallamiento acústico

Figura 3. Reflexión acústica

Figura 4. Difracción acústica

En un entorno urbano existen elementos que son comunes a la mayoría de las ciudades en el mundo. De acuerdo con Oliveira, V (2016) “en una ciudad hay elementos físicos que dan forma y estructura a una ciudad, tales como calles y edificios, dichos elementos forman parte de la forma urbana y al estudio de dicha forma se le conoce como morfología urbana” [35]. La morfología urbana interviene en la transmisión del sonido al provocar fenómenos de onda como apantallamiento, reflexión y difracción que modifican los niveles de ruido. Los edificios forman parte de la morfología urbana y al contar con fachadas provocan fenómenos acústicos.

La influencia de la morfología urbana sobre la propagación del ruido ha sido estudiada y se ha observado que hay una relación directa entre ambos factores. Algunos estudios demuestran que en los entornos urbanos hay variables que modifican los niveles totales de ruido. Entre ellos, Ariza *et al* (2014) mediante un experimento en la ciudad de Córdoba con un análisis multifractal evaluaron el comportamiento del ruido en dos vecindarios. Los mapas axiales de cada zona de estudio fueron trazados y se obtuvo una correlación positiva entre el cociente del ancho de las calles y la altura de los edificios con los niveles totales de contaminación acústica. Es decir, a medida que aumenta el

ancho de las calles con respecto a la altura de los edificios, los niveles totales de ruido incrementan [36]. Con esto se comprueba que al considerar factores como los anchos de las calles y las alturas de los edificios, se puede realizar una planeación más cuidadosa de una ciudad para minimizar los niveles de ruido.

Durante la propagación del ruido siempre se presentan estos fenómenos acústicos independientemente del tipo de fuente. El ruido de tráfico se ha estudiado ampliamente y se ha observado que en su propagación hay variables que modifican la generación del ruido. Los fenómenos dependen entre otras cosas del entorno en el que estén presentes los eventos de ruido de tráfico. Es decir, si el ruido es generado en una carretera habrá elementos de la topografía como montes o valles que podrán generar diversos fenómenos acústicos. En el caso de una ciudad, los edificios pueden provocar fenómenos acústicos como se muestra en las Figuras 5 y 6.

Figura 5. Difracción acústica para ruido de tráfico

Figura 6. Apantallamiento acústico para ruido de tráfico

La morfología urbana influye sobre el ruido de tráfico. Ejemplo de esto es un estudio realizado por Oliveira, S y Sila, L (2010), donde se llevaron a cabo simulaciones de ruido de tráfico en conjuntos de edificios con distinto número de pisos y se utilizó el método de predicción de ruido de tráfico NMPB 96. Para evaluar el impacto de los entornos urbanos sobre el ruido de tráfico se utilizaron variables como el índice de ocupación, mismo que indica la relación entre la superficie ocupada por edificios y la superficie total, el índice volumétrico, que indica el espacio entero sobre la tierra tomando en cuenta la superficie, el número y altura de los pisos, el índice de compacidad

que considera las formas de las áreas urbanas, la fragmentación global del paisaje urbano y el índice de porosidad que indica la proporción de espacios abiertos con respecto al área urbana total.

Se calculó el nivel de presión sonora continuo equivalente L_{eq} y se observó cómo se comportaban los niveles L_{eq} con respecto al cambio de cada variable en dos tipos de formas urbanas donde había seis pares de edificios con calles transitadas en los extremos. Al aumentar el número de pisos, el nivel de ruido disminuía entre dos edificios porque a medida que la altura aumentaba, el tamaño de las zonas sombra incrementaba. También se evaluó cómo se comportaba el ruido en los espacios abiertos, y se concluyó que mientras mayor fuese el índice de porosidad, mayores eran los niveles promedio de L_{eq} . Es decir, mientras mayor es la cantidad de espacios abiertos, el ruido penetra en las formas urbanas con mayor facilidad. Con el aumento del índice de compacidad, los valores medios de L_{eq} también aumentan, porque mientras más regulares sean las formas urbanas menor será la posibilidad de formación de zonas sombra [37].

La influencia de las formas urbanas en el ruido de tráfico también fue estudiada por Guedes, I *et al* (2011). En su estudio se examinó una zona residencial en donde se contaba con diversas situaciones que modifican los niveles de ruido de tráfico. Entre ellos, el tipo de calles, la altura de los edificios, el número de pisos por edificio y el ancho de las calles. Se realizaron mediciones en sitios con distintos parámetros y posteriormente se llevaron a cabo simulaciones. El ruido fue caracterizado en función del flujo vehicular y del porcentaje de vehículos pesados en cada avenida en los períodos de mayor cantidad de tráfico. Con esto se observó que en regiones con una alta densidad constructiva, los edificios se comportan como barreras acústicas atenuando los niveles de ruido. Mientras que con las simulaciones se observó que la atenuación depende de la forma y posición de los edificios con respecto a la fuente de ruido. También se concluyó que en calles con edificios a ambos lados no siempre incrementan los niveles de ruido. Esto se debe a que las distintas alturas entre fachadas vecinas de los edificios reducen la concentración de ruido en fachada. Además, se observó que los edificios cercanos a las calles están expuestos a mayores niveles de ruido con respecto a los más lejanos a ellas [38].

Mediante distintos estudios se ha comprobado que la morfología urbana influye también sobre el ruido producido por otras fuentes, entre ellas los aerogeneradores. En un estudio realizado por Qu, F & Kang, J (2017), se hicieron simulaciones en Cadna/a en diferentes sitios de Inglaterra y se observó cómo se ve atenuado el ruido producido por aerogeneradores en edificios con distintas características. Se observó una diferencia de niveles sonoros continuos equivalentes de alrededor de 10-20 dBA entre fachadas expuestas y cubiertas. Además, se observó que la atenuación de los

niveles de presión sonora es mayor para edificios sencillos a distancias fuente-receptor de entre 300 y 600m. Mientras que para edificios contiguos, las atenuaciones aumentaban a distancias de 1000m [39].

Mediante el estudio de la propagación del ruido en entornos urbanos, se ha determinado la influencia de la morfología urbana sobre los niveles sonoros en zonas aledañas a las fuentes de ruido. Sin embargo, la mayoría de estos estudios están enfocados en el ruido de tráfico, mismo que cuenta con características geométricas distintas a las del ruido de aviación. El ruido de aviación, a diferencia del ruido de tráfico, cuenta con una altitud con respecto al receptor, por lo que la propagación se ve modificada. Por lo tanto, hay otras variables dentro de la geometría fuente receptor que modifican su propagación y con ello los niveles de presión sonora.

Las reflexiones, el apantallamiento y la difracción acústica también están presentes con el ruido de aviación. Sin embargo, a diferencia del ruido de tráfico, la fuente de ruido es elevada como se observa en la Figura 7. En los entornos urbanos, los edificios producirán fenómenos acústicos. No obstante, no se sabe hasta qué punto estos fenómenos influyen en el ruido de aviación y es necesario cuantificar sus efectos.

Figura 7. Propagación de ruido de aviación vs ruido de tráfico

La presencia de edificios en un entorno urbano hace que la propagación del ruido sea modificada. En el caso del apantallamiento acústico, se puede esperar que al no tener una transmisión directa entre fuente y receptor exista un menor nivel de presión sonora que cuando haya una transmisión directa en la propagación del ruido. En el caso de las reflexiones, se puede esperar un mayor nivel de ruido cuando haya una fachada de un edificio provocando reflexiones que cuando el receptor se encuentre en un sitio sin superficies reflectantes. La presencia de edificios provocará que las ondas sonoras sufran fenómenos de difracción. Todos estos fenómenos también se dan con el ruido de aviación y se pueden observar en las Figuras 8 y 9.

Figura 8. Ejemplos de transmisión directa y apantallamiento de ruido de aviación.

Figura 9. Ejemplos de transmisión de ruido de aviación en presencia y ausencia de superficies reflectantes

En un entorno urbano, la propagación del ruido de aviación se ve afectada por diversos elementos. En un estudio realizado por Donovan, P.R. (1973) mediante un modelo a escala de una ciudad y una fuente que simulaba el ruido producido por un avión se comprobaron de manera experimental las atenuaciones que se obtendrían en una calle con edificios a ambos lados según características de la geometría fuente-receptor. En casos donde las altitudes de los vuelos eran de al menos cinco veces la altura del edificio más alto, disminuían las diferencias entre niveles de ruido en referencia y fachada. Con este experimento se concluyó que una forma de minimizar los niveles de presión sonora era mediante el aumento de la altitud de los vuelos ya que con esto los niveles en fachada son semejantes a los que se miden en condiciones de referencia [40].

Ismail, M.R., & Oldham, D.J. (2002) realizaron un estudio donde se muestran los efectos de las calles U sobre el ruido de aviones sobrevolando a bajas alturas. Por medio de un modelo en el que había reflexiones especulares, se observó el efecto de la introducción de fachadas sobre la diferencia de niveles entre el ruido en referencia y fachada. Se observó que a medida que

aumentaba la relación de la altura del edificio con la altitud del vuelo y al cambiar el ancho de la calle se producían cambios mínimos en los niveles de ruido [41].

Hao, M. & Kang, J. (2014) llevaron a cabo un estudio donde mediante simulaciones con Cadna/A se buscó la influencia de la morfología urbana sobre la atenuación del ruido de aviación sobrevolando entornos urbanos. Se consideró al avión como una fuente extendida con cinco distintas distancias horizontales entre fuente y receptor (0, 100, 300, 600 y 1000m) y dos altitudes de vuelo (60,96m y 121,92m). Con las simulaciones, las mayores variaciones de la atenuación del nivel de ruido de los aviones ocurrieron a la distancia horizontal de 1000m y a la altitud de 121,92m. A estas distancias y altitudes los niveles registrados en fachada disminuyeron porque con una altitud mayor los efectos de apantallamiento de los edificios eran reducidos [42].

Lugten *et al* (2016) llevaron a cabo un experimento en el aeropuerto de Schiphol en Amsterdam y realizaron mediciones en un edificio cercano a la pista de vuelo. Los aviones despegaban muy cerca del edificio donde se llevaron a cabo las mediciones. Las altitudes que alcanzaban los aviones eran de 50m y 100m y las distancias horizontales hacia los sitios donde se hicieron las mediciones eran de 300m y 700m. Se hicieron simultáneamente mediciones de eventos de ruido de aviación con dos micrófonos ubicados en dos fachadas, una expuesta y otra cubierta. Se midió el nivel de presión sonora global ponderado A en ambas fachadas y se observó una disminución de 15 dBA en la fachada cubierta con respecto a la fachada expuesta. Con este estudio se comprobó que los edificios provocan efectos de apantallamiento acústico, mismo que lleva a la atenuación de los niveles sonoros producidos por el ruido de aviación [43].

Con todos estos estudios, se puede observar que la morfología urbana, la geometría fuente-receptor y algunas variables operativas tienen influencia sobre los niveles de ruido provocados por aviones. Hay ciertas variables que dependen del sitio donde se hace la medición y que pueden modificar la propagación del ruido de aviación. Esta tesis tiene por objeto identificar dichas variables para el ruido de aviación en un entorno urbano y cuantificar sus efectos.

1.2 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

A continuación, se describen las razones por las que se lleva a cabo esta investigación:

1. Se han llevado a cabo numerosos estudios donde se ha demostrado que la morfología urbana tiene un impacto sobre el ruido producido por fuentes sonoras como el tráfico. En un entorno urbano existen muchos elementos que interactúan con las ondas sonoras modificando su propagación y dando origen a distintos niveles de presión sonora. El ruido

de aviación es producido por fuentes con características determinadas que hacen que la propagación de las ondas sonoras sea distinta. Así como la morfología urbana puede afectar la propagación del ruido de tráfico, también puede hacerlo con el ruido de aviación. Actualmente, no existen muchos estudios sobre los efectos de la morfología urbana sobre el ruido de aviación.

2. Los modelos de propagación de ruido de aviación más extendidos hacen las simulaciones sin reflexiones y no contemplan las edificaciones ni la morfología urbana. Por lo tanto, los niveles de ruido que calculan los actuales modelos son equivalentes a los que se medirían en una posición de referencia como lo indica el Anexo B de la norma ISO 1996-2. En un entorno urbano existen elementos que modifican la propagación e intervienen en la geometría fuente-receptor provocando reflexión, difracción y apantallamiento acústico. La presencia de edificios puede ocasionar que se reduzca el ángulo de vista β desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo. La altitud de los vuelos hace que las ondas sonoras incidan con un ángulo de *slant* γ pudiendo alterar la relación e interferencia entre sonido directo y reflejado. Los tipos de calle con los que cuenta un entorno urbano pueden provocar más reflexiones según el número de superficies reflectantes con las que cuenten. Una caracterización de la propagación del ruido en los diversos tipos de calle con distintos ángulos de vista β y ángulos de *slant* γ puede contribuir a realizar un análisis más detallado del ruido de aviación incidente en la zona de estudio. Por lo tanto, es necesario cuantificar la influencia de estas variables sobre los niveles de ruido en fachada.
3. Para estudiar el ruido interior provocado por los aviones, debe conocerse el ruido exterior y el aislamiento. El aislamiento que debe tener un inmueble se valora a partir del nivel de ruido en fachada y las condiciones del recinto estudiado. Con la metodología que se desarrolla en esta tesis se pretende proporcionar un método para calcular los niveles de ruido en fachada, lo que permitirá detallar de forma más precisa el aislamiento necesario para un recinto determinado.
4. Para las mediciones de ruido de aviación, el Anexo B de la norma ISO 1996-2 indica una posición de referencia libre de obstáculos y superficies reflectantes para estandarizar y hacerlas comparables. Sin embargo, existen situaciones en las que no es posible encontrar una referencia adecuada y las mediciones se deben llevar a cabo cerca de superficies reflectantes. Es necesario desarrollar una metodología que permita extrapolar el nivel de ruido en la posición de referencia.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación plantea diversos objetivos generales que conllevan objetivos específicos. A continuación, se enuncian los objetivos generales y específicos.

1.3.1 OBJETIVOS GENERALES

1. Identificar factores significativos relativos a la propagación del ruido de aviación en relación con la morfología urbana: Los edificios y las calles en conjunto con características del ruido de aviación como su geometría y variables operativas modifican la propagación del ruido. Es necesario identificar cuales variables tienen una influencia significativa en su propagación.
2. Cuantificar la influencia de los factores de la morfología urbana: Una vez encontradas las variables significativas es necesario cuantificar el impacto que cada una posee sobre la propagación del ruido.
3. Definir una metodología para el análisis: Para realizar el análisis de las variables definidas, es necesario definir una metodología que recoja escenarios de estudio, tipos de ensayos a realizar y condiciones estándar de cada uno de los escenarios para obtener resultados comparables.
4. Proponer un modelo que relacione las diferentes variables de la morfología urbana consideradas con las variables de estudio para determinar el nivel de ruido en fachada.
5. Proponer un modelo de corrección para mediciones y simulaciones para obtener resultados comparables a los que se medirían en la posición de referencia que indica el Anexo B de la norma ISO 1996-2.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Buscar escenarios que permitan llevar a cabo el análisis de manera adecuada: Para modelar el cambio de la propagación del ruido de aviación provocado por la morfología urbana, es necesario encontrar ubicaciones con exposición al ruido de aviación que contengan las variables que se desean analizar. Para caracterizar de una manera precisa la propagación del ruido de aviación en entornos urbanos, los escenarios deben cumplir con las siguientes características:
 - a. Exposición al ruido de aviación ($L_d, L_e > 60 \text{ dBA}$).
 - b. Inmuebles tales que las trayectorias de aviones permitan evaluar la influencia de distintas topologías de calle, ángulos de vista β y ángulos de *slant* γ sobre los niveles de ruido en fachada.

- c. Posiciones de referencia libres de reflexiones y obstáculos en cada inmueble.
- 2. Recopilar datos de ruido de aviación en la mayor cantidad posible de escenarios.
 - a. Realizar captura de datos en posición de fachada para determinar los efectos de un tipo de calle con sus respectivos ángulos de vista y *slant* sobre los niveles de ruido de eventos de aviación en condiciones de referencia.
 - b. Realizar captura de datos en posición de referencia para reducir la influencia individual de cada evento individual de cada evento de ruido de aviación sobre los niveles de ruido medidos en fachada.
- 3. Clasificar eventos de ruido de aviación en función de su topología de calle (U o L), el ángulo de vista β y el ángulo de *slant* γ .
- 4. Determinar si los factores de estudio son relevantes y estadísticamente significativos en la propagación del ruido de aviación.
- 5. Identificar la relación entre la propagación de ruido y los factores de estudio.
- 6. Cuantificar el efecto de las diferentes variables sobre la propagación del ruido de aviación por medio de un análisis de regresión lineal.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Para describir el desarrollo de la investigación llevada a cabo por el doctorando se siguió una estructura mediante capítulos que se muestra a continuación:

El capítulo 1 incluye el estado del arte de estudios de la influencia de la morfología urbana en los niveles de inmisión provocados por aeronaves, el impacto del ruido de aviación en la salud y la propagación del ruido aeroportuario. Se muestran también las estrategias que se han adoptado actualmente para minimizar los niveles de ruido provocados por los aeropuertos.

En el capítulo 2, se exponen las actuales normas que indican cómo deben realizarse las mediciones de ruido de aviación. También se definen los parámetros utilizados en esta tesis para evaluar la influencia de la morfología urbana en la propagación del ruido de aviación. Mediante una descripción detallada se explica la metodología utilizada para llevar a cabo el análisis incluyendo las mediciones de ruido y se muestran los escenarios encontrados junto con los criterios de clasificación de cada evento.

En el capítulo 3, mediante los resultados de los análisis estadísticos realizados, se muestran los factores de influencia dentro de la propagación del ruido de aviación. También a través de análisis de regresión lineal se expone una cuantificación de los efectos de cada factor de influencia sobre los

niveles de ruido de aviación en fachada y referencia. Por medio de estos resultados se nota qué variables tienen mayor peso sobre los niveles de ruido y se muestra cuanta información proporcionan los modelos de los escenarios analizados a partir de los ajustes obtenidos.

En el capítulo 4 se muestran las conclusiones obtenidas a partir de los resultados de los análisis estadísticos expuestos en el capítulo 3. En las conclusiones se explican los efectos de las variables analizadas sobre la propagación del ruido de aviación en función de los fenómenos de onda que produce cada factor. También se incluyen las conclusiones a partir de las pruebas realizadas a los modelos junto con las aportaciones realizadas durante el desarrollo de la tesis.

En los anexos se incluyen mapas de las trayectorias que fueron utilizadas para llevar a cabo los análisis, y un glosario de términos que permitirán al lector tener una visión general de la terminología utilizada y la exposición de cada ubicación al ruido de aviación para facilitar la comprensión de la tesis.

2. PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE AVIACIÓN EN ENTORNOS URBANOS

2.1 NORMATIVA VIGENTE SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO EN EXTERIORES Y SUS EFECTOS EN LOS NIVELES DE INMISIÓN EN INTERIORES

Existen normas internacionales que explican cómo se da la propagación del sonido en exteriores. Los estándares indican maneras en las que se puede caracterizar la propagación del ruido en exteriores al considerar la presencia de obstáculos y la distancia fuente-receptor. Las ondas sonoras cuando se propagan en exteriores experimentan fenómenos como los que se mencionan en la norma ISO 9613-2 (reflexión, difracción y apantallamiento acústico). Posteriormente, al alcanzar un edificio, las ondas acústicas serán afectadas dando origen a distintos niveles de presión sonora en fachada. El nivel de ruido producido en el exterior de un edificio provoca que los recintos en su interior sean afectados. Por eso, la norma ISO 12354-3 propone un modelo para calcular el aislamiento acústico. Es decir, la diferencia de presión acústica entre los niveles medidos en fachada y los producidos en el interior del recinto receptor. En esta norma se calcula la diferencia de nivel estandarizada $D_{2m,nT}$, que es la diferencia entre el nivel de presión producido fuera del recinto a 2m de la fachada y el nivel de presión acústica en el interior del recinto receptor relativa a un valor de referencia del tiempo de reverberación. Dicha diferencia se calcula en función de la influencia de la forma exterior de la fachada y las dimensiones del recinto como se muestra en la Ecuación 1.

$$D_{2m,nT} = R' + \Delta L_{fS} + 10 \log \frac{V}{6T_0S} \quad [1]$$

Donde V es el volumen en metros cúbicos, S es el área total de la fachada vista desde el interior en metros cuadrados y T_0 es el tiempo de reverberación de referencia que para viviendas es de 0,5 segundos. ΔL_{fS} está definido en la Ecuación 2 y es la diferencia de nivel debida a la forma de fachadas con relieve.

$$\Delta L_{fS} = L_{1,in} - L_{1,s} + 6 \text{ dB} \quad [2]$$

Donde $L_{1,in}$ es el nivel de presión acústica medio en el plano de la fachada, sin estar presente la fachada y $L_{1,s}$ es el nivel de presión acústica medio sobre la superficie exterior del plano de la fachada real, ambos con unidades en decibelios. En la Figura 10 se muestran una fachada cerrada y una fachada con tejado. En el caso de la fachada cerrada mostrada del lado izquierdo de la figura, ΔL_{fS} es igual a cero porque no cuenta con elementos que limiten la línea de vista con la fuente de ruido. Para el caso de la fachada con tejado mostrada del lado derecho de la figura, el valor de ΔL_{fS} dependerá del coeficiente de absorción del material del tejado y de la altura a la que se coloque el

micrófono sobre el suelo del balcón. Por ejemplo, si la altura del micrófono es inferior a 1,5m y se tiene un coeficiente de absorción de 0,6, ΔL_{fs} valdrá -1. Es decir, un recinto tendrá un aislamiento distinto con respecto al ruido producido en el exterior en función de los elementos que tenga su fachada y las dimensiones del recinto receptor, ΔL_{fs} cuantifica dicho aislamiento.

Figura 10. Escenarios de fachadas para ΔL_{fs}

R' es definido por la Ecuación 3 y es el índice de reducción acústica aparente de la fachada para campo incidente difuso. Dicho índice se calcula mediante la adición de la potencia acústica transmitida por cada uno de los elementos y la potencia acústica transmitida de forma indirecta.

$$R' = -10 \log(\sum_{i=1}^n \tau_{e,i} + \sum_{f=1}^m \tau_f) \text{ dB} [3]$$

Donde $\tau_{e,i}$ es una relación entre la potencia acústica emitida por el i -ésimo elemento de fachada debida a la transmisión directa del campo incidente en este elemento y la potencia acústica incidente sobre toda la fachada. Mientras que τ_f es el cociente entre la potencia acústica emitida por el elemento de la fachada o de flanco f en el recinto receptor debido a una transmisión indirecta y la potencia acústica incidente sobre toda la fachada. El parámetro n es el número de elementos de la fachada para transmisiones directas y m es el número de elementos de flanco de la fachada. Este parámetro proporciona una medida del aislamiento acústico de una fachada en función de la pérdida de potencia acústica que origina cada elemento de fachada.

La norma ISO 12354-3 propone un modelo para calcular el aislamiento acústico de una fachada o de cualquier otra superficie externa de un edificio, incluyendo las transmisiones directas e indirectas de ruido proveniente del suelo como el producido por tráfico [44]. Al tratarse de ruido producido en el exterior, el ruido de aviación también influirá en los niveles interiores como se especifica en la norma ISO 12354-3. Sin embargo, en el ruido de aviación la fuente es elevada por lo que el ruido proviene desde arriba. Por lo tanto, al tratarse de una fuente sonora elevada, la incidencia de las ondas sonoras será distinta y con ellos los niveles de ruido se verán afectados.

Para observar el nivel de presión sonora que producirá el ruido de aviación en una fachada es necesario medir los niveles de inmisión que produce. Un diagnóstico de los niveles de inmisión producidos por ruido de aviación es necesario para calcular el impacto que tendrá en la región donde se localiza un edificio. Una manera de diagnosticar los niveles de ruido en una zona con exposición al ruido de aviación es mediante la implementación de estaciones de monitorizado. La norma ISO 20906 establece las bases técnicas para implementar un sistema de monitorizado de ruido de aviones desatendido y en situaciones sonoras complejas con múltiples aeronaves y otras fuentes de ruido.

Figura 11. Geometría fuente-receptor de estación de monitorizado de ruido de aviación.

La geometría fuente-receptor de una estación de monitorizado de ruido de aviación, tanto en vista bidimensional como tridimensional, se puede observar en la Figura 11 según lo establecido en la norma ISO 20906. En dicha figura se muestra que hay línea de vista entre el punto de medición y la trayectoria definida por el ángulo de vista 2ω . Este ángulo se forma por la posición del avión con respecto al punto de medición. También se observa que como las trayectorias cuentan con una altitud, el ángulo 2ω es tridimensional. Por lo tanto, el ángulo 2ω puede ser modificado por la presencia de obstáculos como edificios. La línea s representa la distancia perpendicular más corta sobre plano desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo y es llamada también distancia de *slant*. Habitualmente a la distancia de *slant* se tiene el pico de la forma de onda, mismo que a las distancias $3s$ disminuye aproximadamente 10 dBA. La distancia de *slant* junto con la altitud del vuelo da origen al ángulo γ o ángulo de *slant*.

Para que las mediciones sean consistentes y repetibles, se recomienda que el sistema de monitorizado de ruido de aviación cumpla con los siguientes requisitos: El micrófono debe ser colocado en una posición donde no haya ningún obstáculo en un radio de 10m y a una altura mínima de 6m sobre el suelo para minimizar los efectos de las reflexiones y obtener los niveles de presión sonora en condiciones de referencia. Una vez identificado el evento, se calcula el nivel de presión sonora en el intervalo de tiempo en el que se produce, dicho parámetro es conocido como L_{AE} que es el nivel de exposición sonora y es calculado como se muestra en la Ecuación 4. Donde se expresa que para calcular el nivel L_{AE} del i -ésimo evento es necesario realizar la sumatoria de los niveles $L_{Aeq,1s}$ en el intervalo de tiempo en el que es producido el evento promediando sobre un tiempo de referencia T_0 de 1 segundo [45].

$$L_{AEi} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq,1s}}{10}} \right) [4]$$

La implementación del procedimiento de la norma ISO 20906 permite obtener el nivel de ruido de aviación en condiciones de referencia considerando la presencia de una superficie reflectante horizontal debajo del micrófono. El nivel de ruido en condiciones de referencia suele ser el utilizado para describir la exposición al ruido de aviación en sitios aledaños a un aeropuerto y también viene especificado en el Anexo B de la norma ISO 1996-2 como una cantidad utilizada para estandarizar y hacer repetibles las mediciones de eventos de ruido de aviación. Sin embargo, cuando se cuenta con superficies reflectantes verticales, el Anexo B de la norma ISO 1996-2 especifica dos casos aparte de la referencia en los que se puede extrapolar el nivel de presión sonora en condiciones de referencia por medio de unas correcciones [46]. Las condiciones que deben cumplir las posiciones que establece el Anexo B se mencionan a continuación:

- Posición de referencia: Como se observa en la Figura 12, en esta posición no hay superficies reflectantes alrededor del micrófono salvo el suelo. En la norma ISO 1996-2 se establece que la distancia del micrófono a cualquier superficie reflectante aparte del suelo debe ser al menos dos veces la distancia del micrófono a la parte dominante de la fuente sonora. El nivel de ruido en esta posición es el nivel de referencia, el nivel incidente.

Figura 12. Posición de referencia

- Posición con el micrófono directamente sobre la superficie reflectante: Las condiciones del micrófono en las que se realizan mediciones en esta posición se muestran en la Figura 13. En esta posición, se puede esperar un incremento de 6 dB, mismos que se aplican para estandarizar con respecto a la referencia. Es necesario tener cuidado con la colocación del micrófono sobre la superficie para evitar efectos de difracción que rompan la repetibilidad o consistencia del método.

Figura 13. Posición con micrófono directamente sobre la superficie reflectante.

- Posición del micrófono cerca de una superficie reflectante: Como se observa en la Figura 14, el micrófono se encuentra a una distancia entre 0,5 y 2m frente a la superficie reflectante y a una altura de 4 m sobre el suelo. Debe evitarse colocar al micrófono cerca de

bordes o elementos que puedan provocar fenómenos de difracción. No se debe colocar el micrófono a distancias inferiores, porque a distancias a partir de 0,5m se asegura que el campo resultante esté lo suficientemente lejos de la región de incremento de +6 dB. Cerca de una superficie reflectante los campos que recibe el micrófono son el transmitido directamente por la fuente de ruido y el provocado por las reflexiones. Por consiguiente, el nivel de ruido medido sería alrededor de 3 dB más alto del que se registraría en la posición de referencia.

Figura 14. Posición del micrófono cerca de una superficie reflectante.

Estos factores de corrección han sido estudiados para el ruido de tráfico. En estudios realizados por Memoli *et al* (2008), Jagniatinskis & Fiks (2016), Montes González (2015) y Picaut *et al* (2005) se ha observado que los factores de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2 no siempre se cumplen dado que hay condiciones climáticas y factores de la geometría fuente-receptor que pueden afectar a dichos niveles de presión sonora [47, 48, 49, 50]. Al respecto de la geometría fuente-receptor, Barrigón, J.M. (2016) menciona que el Anexo B de la norma ISO 1996-2 no especifica una distancia entre fuente y receptor [51]. Esta es una variable de la propagación de ruido que es importante considerar ya que puede modificar la incidencia de las ondas sonoras y con ello el factor de corrección.

Los procedimientos que proponen el Anexo B de la norma ISO 1996-2 y la norma ISO 20906 buscan caracterizar el ruido incidente como el caso de la posición de referencia. La diferencia entre ambos procedimientos es que en la norma ISO 20906 solo se contemplan posiciones de referencia. En un entorno urbano por la cantidad de agentes que se interponen en la propagación del ruido de aviación entre fuente y receptor no siempre es posible encontrar localizaciones que recreen las condiciones de referencia. Las fachadas de los edificios se comportan como superficies reflectantes incrementando el nivel de ruido medido en la posición de referencia. Como se observa en la Figura 15, en la posición de referencia se mide el nivel de ruido incidente, mientras que en la posición de

fachada se miden conjuntamente el nivel de ruido incidente y el reflejado, lo que constituye el ruido total medido. Los niveles de exposición sonora medidos de los i -ésimos eventos para cada posición son definidos mediante las Ecuaciones 5 y 6, donde se observa que los niveles son promediados sobre un tiempo de referencia T_0 de 1 segundo.

Figura 15. Incidencia de ruido de aviación en posiciones de fachada y referencia

$$L_{AE\ referencia\ i} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_i 10^{\frac{L_{AEq\ referencia,1s}}{10}} \right) [5]$$

$$L_{AE\ fachada\ i} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_i 10^{\frac{L_{AEq\ fachada,1s}}{10}} \right) [6]$$

En la Figura 15 se muestran los campos sonoros que se reciben tanto en la posición de referencia como en la posición de fachada. La posición de fachada experimenta una amplificación con respecto a la posición de referencia porque además de recibir el campo sonoro incidente, las reflexiones están presentes. En un entorno urbano, existen muchos factores que modifican los niveles del campo sonoro incidente. De acuerdo con Lyon, R (1973) cuando el sonido se propaga a lo largo de una calle, en ocasiones existirá una transmisión directa desde la fuente hasta el receptor. Adicionalmente, pueden existir múltiples caminos de propagación provocados por las reflexiones si se cuenta con edificios a ambos lados de la calle. Sin embargo, si las calles son anchas, el incremento del nivel de presión sonora será menor al haber un mayor espacio abierto entre los edificios. En el caso del ruido de aviación la fuente de ruido es elevada. Por lo que existirán escenarios en los que los niveles de ruido se incrementen por las reflexiones ocasionadas o se atenúen por el apantallamiento provocado por los edificios [52]. En un entorno urbano la propagación es más compleja con respecto a la propagación en condiciones de referencia por la presencia de corredores y edificios que modifican la geometría fuente-receptor. En el siguiente apartado se muestran los factores de estudio presentes en un entorno urbano que se analizan en esta tesis.

2.1.1 FACTORES DE ESTUDIO

2.1.1.1 FACHADAS EXPUESTA Y SOMBRA

La norma ISO 20906 se enfoca en realizar mediciones en puntos con exposición al ruido de aviación. Dicha norma también establece que al medir los niveles de presión sonora de cada evento de ruido de aviación, habitualmente el nivel más alto medido con un sonómetro tipo 1 se encontrará a la distancia perpendicular más corta desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo, o distancia de *slant* [45]. Sin embargo, cuando las mediciones se llevan a cabo en un punto sin línea de vista hacia la trayectoria de vuelo, también hay una distancia de *slant* dentro de la cual pueden existir elementos que actúen como obstáculos. Por lo tanto, si a la distancia de *slant* hay obstáculos presentes, es previsible que esto resulte en una atenuación del nivel de ruido con respecto al medido en la posición de referencia.

En este estudio se pretende analizar la influencia de los obstáculos a la distancia de *slant*. Para ello, se ha definido una variable que es la posición de la fachada. Dicha variable indica qué eventos se han registrado en transmisión directa o indirecta a la distancia de *slant*. Mediante esta variable se clasifica como fachadas expuestas a aquellas que no tienen obstáculos entre fuente y receptor y como fachadas sombra a las que cuentan con obstáculos a la distancia de *slant*. Cuando se tienen eventos con fachada sombra, el mismo edificio donde se lleva a cabo la medición supone un obstáculo para la medición. Como se observa en la Figura 16, un evento medido en el punto de medición 1 sería clasificado como uno con fachada expuesta al no haber obstáculos a la distancia s_1 , mientras que el punto de medición 2 sería clasificado como uno con fachada sombra al haber obstáculos a la distancia s_2 .

Figura 16. Ejemplo de fachadas expuestas y sombra.

2.1.1.2 ÁNGULO DE VISTA

La morfología urbana cuenta con elementos que modifican los niveles de presión sonora producidos por una fuente de ruido limitando la línea de vista. La línea de vista se refiere a la transmisión directa de sonido entre fuente y receptor en ausencia de obstáculos. En el ruido de aviación, de acuerdo con la norma ISO 20906 en ausencia de obstáculos a las distancias de *slant* y 3s mostradas en la Figura 11, normalmente se obtiene el máximo nivel de ruido al no contar con elementos que actúen como barreras que atenúen los niveles de ruido producidos por un evento. Los edificios pueden bloquear la transmisión directa del ruido al encontrarse en medio de las distancias de *slant* y/o 3s generando distintas líneas de vista. En consecuencia, los edificios son uno de los factores que bloquea la transmisión directa entre fuente y receptor en un ambiente urbano.

El comportamiento de una barrera acústica ha sido modelado en numerosos estudios donde se demuestra que la efectividad de dicha barrera depende de qué tan oculto se encuentre el receptor de la fuente de ruido. Li & Tang (2003) validaron el comportamiento de una barrera frente a un edificio mediante un modelo de propagación del ruido de una fuente puntual. En dicho modelo se estableció que los niveles de presión sonora más altos se tendrán cuando al receptor lleguen ondas acústicas tanto por fenómenos de difracción como por las reflexiones con la fachada. Mientras que los niveles disminuirán mientras aumente la distancia entre fuente y receptor [53].

El fenómeno de apantallamiento acústico se hace presente en la propagación del ruido producido por una fuente cuando existe una barrera que bloquee la transmisión de las ondas sonoras. En los entornos urbanos el apantallamiento acústico es ocasionado principalmente por los edificios. Los edificios de esta manera pueden atenuar el ruido producido por tráfico y trenes modificando la exposición al ruido producido por estas fuentes. Los edificios sirven como barreras a otros inmuebles al bloquearles la línea de vista con las fuentes sonoras.

En el ruido de aviación, a diferencia del ruido de tráfico o ferroviario, la altitud permite que los efectos de apantallamiento provocados por los edificios sean reducidos. De manera que un mismo evento de ruido de aviación tendrá transmisión directa con muchos edificios de manera simultánea. Cuando los edificios estén presentes entre la trayectoria de vuelo y un punto de medición, el apantallamiento acústico tendrá lugar. Los edificios modifican el ángulo de vista al bloquear la transmisión directa del ruido producido por los aviones, lo cual resulta en un desajuste con respecto del ángulo de vista especificado en la norma ISO 20906. Así, en lugar de que haya una exposición total de las fachadas, habrá una exposición parcial a las trayectorias de vuelo.

Cuando un edificio esté presente en la propagación del ruido de aviación, el ángulo de vista se verá alterado ya que el propio edificio donde se evalúa el sonido apantalla al ruido. En esta tesis, se

ha definido un ángulo de vista β mediante el cual se pretende determinar qué fracción de trayectoria de vuelo está en transmisión directa con un punto de medición. Dicho ángulo está formado por la posición de la trayectoria de vuelo y la línea descrita por la fachada donde se evalúan los niveles de ruido como se observa en la Figura 17 y en ausencia de obstáculos debería ser aproximadamente igual al ángulo 2ω definido por la norma ISO 20906. La posición de una trayectoria de vuelo está compuesta por la altitud del vuelo y la distancia horizontal desde el punto de medición hasta la trayectoria. En las Figuras 17 y 18 se muestran los ángulos de vista β en planos tanto bidimensionales como tridimensionales, donde se aprecia que el avión se encuentra dentro del ángulo β , mismo que se utiliza en esta tesis para evaluar la variación de los niveles de ruido según la fracción del vuelo que tenga transmisión directa con la fachada. Como se observa en la Figura 17, cuando la distancia de *slant* entre el punto de medición y la trayectoria de vuelo es superior a 20m, se puede hacer una simplificación en un plano bidimensional. También, en la Figura 18, se muestra un caso donde la distancia horizontal entre el punto de medición y la trayectoria de vuelo es tan corta que se hace una aproximación donde el ángulo de vista en lugar de tomarse en el plano bidimensional se toma en el espacio tridimensional llegando a 90°.

Figura 17. Formación de ángulos de vista 2D.

Figura 18. Formación de ángulos de vista 3D.

2.1.1.3 TOPOLOGÍA DE CALLE

De acuerdo con Oliveira, V. (2017) “existe una amplia variedad de calles con sus distintos tamaños, formas y maneras de converger con otras calles de los alrededores. La estructura de una calle es influenciada por los elementos a un lado o a ambos lados de la calle, por los edificios, su altura y la relación entre la altura y ancho de las calles” [35]. En entornos urbanos, los edificios darán forma a las calles proporcionándoles un sello que modificará las actividades que se desarrollen en ellas. En la vida cotidiana se llevan a cabo actividades que generan ruido en las calles. El ruido producido en una calle se ve modificado según el tipo de calle del que se trate y la fuente que lo produzca.

La topología de calle es un factor que puede afectar a la propagación del ruido de aviación en entornos urbanos. Las topologías más comunes conocidas son las U que consisten en una calle con edificios a ambos lados de la calle y las L que son aquellas que tienen edificios solo a un lado de la calle. La topología de calle se ha estudiado para observar la influencia que tiene sobre el ruido producido por otras fuentes. Ejemplo de esto lo constituye un estudio realizado por Echevarría, G (2016) donde se comprobó que el tráfico en las calles tipo U afecta los niveles de ruido producidos en fachada considerablemente. Mientras que los cambios en la geometría fuente receptor afectan a los peatones y a las fachadas ubicadas en las plantas bajas de los edificios. Mediante simulaciones del método de diferencias finitas en el dominio del tiempo se observó que los niveles de ruido eran reducidos modificando la inclinación de las ventanas de un edificio o al diseñar las calles en un nivel más bajo con respecto al nivel de los peatones. Con estas simulaciones se puede observar que un diseño de una calle donde se considere el ruido de tráfico puede ayudar a minimizar los niveles de ruido a los que se exponen tanto los peatones como los inquilinos de un edificio [54]. En el caso

del ruido de aviación, la geometría fuente-receptor es distinta por contar con una fuente de ruido elevada. Como se observa en la Figura 19, las calles U producen una gran cantidad de reflexiones por contar con dos paredes. Mientras que en las calles L, los niveles de ruido son modificados con una menor cantidad de reflexiones. Ambas topologías son muy comunes en cualquier entorno urbano y forman parte de elementos que intervienen en la propagación del ruido de aviación en las ciudades. En esta tesis se pretende estudiar la influencia que tiene la topología de calle sobre los niveles de presión sonora en fachada provocados por el ruido de aviación utilizando la clasificación de calles tipo U y L.

Figura 19. Topologías de calle U y L.

2.1.1.4 ÁNGULO DE *SLANT*

La propagación del ruido producido por una aeronave difiere con respecto a la del producido por otros medios de transporte como el tráfico o los trenes. Esto se debe a que en el ruido de tráfico y ferroviario las fuentes sonoras se encuentran al nivel del suelo. Sin embargo, en el ruido de aviación la fuente sonora se encuentra a una altitud determinada con respecto al receptor. Dicha altitud influye en la propagación de ondas acústicas ya que a medida que aumenta, la posición del avión con respecto al punto de medición cambia. De acuerdo con Smith, M (1989) “el nivel máximo de ruido producido por una aeronave puede ser controlado al establecer ciertas condiciones de vuelo como la velocidad de la aeronave y la altitud del vuelo” [55]. Es decir, modificando parámetros

como éstos es posible reducir los niveles de presión sonora producidos por una aeronave ya que estas variables de los eventos de ruido de aviación modifican la incidencia de las ondas sonoras.

Además de la altitud, otra distancia está presente durante la propagación del ruido de aviación: la distancia perpendicular más corta desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo o distancia de *slant*. Estas dos distancias dan origen al ángulo de *slant*, mismo que se observa en la Figura 20 como un ángulo γ . Conforme el ángulo γ cambia, la incidencia de las ondas sonoras es modificada y con ello también los niveles de presión sonora registrados. En esta tesis se estudia la influencia del ángulo de *slant* sobre la propagación del ruido de aviación.

Figura 20. Ángulo de *slant*

2.1.1.5 TIPO DE VUELO

En un aeropuerto se llevan a cabo diversas operaciones que generan ruido. Dichas operaciones van desde el mantenimiento de los aviones hasta las maniobras que deben realizar los pilotos para garantizar que un vuelo se lleve a cabo de manera adecuada y segura. Entre muchas otras operaciones se encuentran los tipos de vuelo. Para llevar a cabo un despegue es necesario activar un sistema de propulsión para que la aeronave se eleve y escale lo suficiente para llegar a una altitud que mantendrá durante la mayor parte del vuelo. Mientras que para un aterrizaje es necesario reducir el mecanismo de propulsión y disminuir la pendiente de deslizamiento para que de manera progresiva el avión vaya reduciendo su altitud y llegue a tierra con seguridad.

De acuerdo con Ashford *et al* (2013), para reducir el ruido producido por un despegue, una de las medidas que están implementándose en los aeropuertos del mundo consiste en reducir la potencia del motor una vez que el avión ha llegado a una altitud segura. Con esta reducción de la potencia, los niveles de ruido decrecen durante la etapa de escalamiento de un vuelo. Sin embargo, el ruido que no es producido durante la etapa del ascenso se producirá a lo largo de la ruta afectando a los

sitios ubicados debajo de la trayectoria de vuelo. Una buena planeación de esta medida de reducción de ruido resultará en una disminución generalizada de los niveles de ruido producidos durante un despegue.

Por otro lado, durante un aterrizaje existen otras medidas que se están implementando para reducir los niveles de presión sonora en zonas aledañas. Una de ellas consiste en comenzar el descenso a alturas mayores con el fin de producir el ruido a mayor distancia de tierra para que la afección sea menor. Otra medida consiste en realizar un descenso continuo empleando radares de vigilancia secundaria para información de la altitud. Esto previene el uso de la potencia en un descenso a pasos y en consecuencia reduce el ruido debajo de algunas zonas del camino de descenso [56].

Como se puede observar con las técnicas de reducción de ruido mencionadas, el tipo de vuelo es una variable operativa que influye directamente sobre el impacto acústico de una aeronave en una región por las distintas maniobras requeridas para su ejecución. Cada tipo de vuelo resulta en emisiones sonoras generadas de manera distinta y con ello en una incidencia en fachada diferente. El tipo de vuelo es otra variable que ha sido considerada dentro de esta tesis para determinar su influencia sobre los niveles de ruido en fachada y se ha clasificado de una manera sencilla en despegues y aterrizajes.

Todas las variables mencionadas anteriormente suelen encontrarse en entornos urbanos cuando el ruido de aviación está presente. Los ángulos de vista β son provocados por la presencia de edificios. Las topologías de calle son construcciones comunes dentro de una ciudad y dichas estructuras provocan diversos efectos sobre la propagación del ruido de aviación. El ángulo de *slant* γ siempre estará presente cuando haya una trayectoria de vuelo y los eventos registrados serán despegues o aterrizajes. Todas estas variables modifican la propagación del ruido de aviación y con ello los niveles de presión sonora. Con el ángulo de vista β se pretende cuantificar la fracción de vuelo en transmisión directa que hay en el punto de medición. En un punto de medición con un ángulo de vista β , se puede esperar que los niveles de presión sonora registrados en fachada sean mayores a medida que el ángulo de vista β aumente por contar con una mayor fracción del vuelo en transmisión directa. Por otro lado, las calles U y L inducen distintos órdenes de reflexiones por el distinto número de paredes con el que cuentan. Por lo tanto, se puede considerar que los niveles de ruido en una calle U serán mayores a los niveles producidos en una calle L. Por consiguiente, en una calle U con un gran ángulo de vista β se esperaría obtener un nivel de presión sonora en fachada mayor al que se obtendría en una calle L con un ángulo de vista β semejante.

2.2 METODOLOGÍA

La morfología urbana afecta a las ondas sonoras incidentes generadas por el ruido de aviación. Sin embargo, se quiere cuantificar cómo se ven afectados los niveles de ruido medidos en fachada. Uno de los objetivos que tiene esta tesis es analizar cómo la topología de calle, el ángulo de vista β y el ángulo de *slant* γ afectan a los niveles de ruido medidos en fachada con respecto a los niveles medidos en la posición de referencia. Esto se pretende demostrar a través de un procesamiento estadístico de los datos mediante un análisis de regresión lineal múltiple que proporcione un modelo como el que se muestra en la Ecuación 7 que permita cuantificar los efectos de cada variable.

$$L_{AE\ fachada i} = L_{AE\ referencia i} + \varepsilon_{\beta} + \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{calle} [7]$$

Donde $L_{AE\ referencia i}$ representa el nivel de ruido en la posición de referencia, ε_{β} los efectos del ángulo de vista, ε_{γ} los efectos del ángulo de *slant* y ε_{calle} los efectos de la topología de calle. Como se observa en la Ecuación 7, si la morfología urbana no afectara a la propagación del ruido de aviación, los niveles de ruido medidos en fachada serían iguales a los niveles de ruido medidos en la posición de referencia. Sin embargo, la morfología urbana afecta a dichos niveles y por medio de este análisis se desea encontrar de qué manera los factores de estudio afectan a la propagación.

Para determinar cómo afectan los parámetros definidos a los niveles de inmisión, es necesario proponer una metodología que permita observar la influencia de variables de la morfología urbana en los niveles de ruido de aviación. Esta metodología incluye un punto de referencia en cada ubicación para tener en consideración la variabilidad de todos los factores bajo estudio. Dicha metodología consta de dos fases: colección de datos y análisis e interpretación de datos.

2.2.1 COLECCIÓN DE DATOS

La fase de colección de datos se refiere a la captura de niveles sonoros provocados por eventos de ruido de aviación en sitios aledaños a aeropuertos. La colección de datos tiene por objeto obtener una muestra representativa de eventos de ruido de aviación que permita analizar las variables de interés. Para llevar a cabo la colección de datos de manera adecuada, es necesario desarrollar un experimento basado en las características del ruido de aviación. Cada evento de ruido de aviación medido en un mismo punto es distinto porque cada vuelo cuenta con un conjunto de elementos que lo hace único como la altitud, la distancia horizontal y el tipo de operación. Además, cada avión produce un espectro de frecuencias característico que cambia los niveles de ruido. El conjunto de todas estas características hace que la propagación del ruido de aviación sea distinta para cada evento en una misma posición, lo cual hace que sea complejo. Para tener en cuenta la variabilidad

producida por cada vuelo individual se decide poner un punto de medición en condiciones de referencia en cada ubicación.

2.2.1.1 POSICIÓN DE REFERENCIA

Para observar cómo es modificada la propagación del ruido de aviación, el escenario ideal consistiría en realizar mediciones de ruido simultáneas en múltiples puntos de una zona específica con varios equipos. De esta manera se podrían observar las variaciones del ruido en distintas regiones de un entorno urbano. Sin embargo, mediante la introducción de una posición de referencia es posible observar las variaciones de los niveles de ruido ya que la introducción de superficies reflectantes modificará la incidencia de las ondas y con ello los niveles de ruido medidos se verán afectados. Por eso, se establece un punto de referencia para cada ubicación donde se consideren los factores relacionados con la propagación y emisión del ruido. Mientras que en un punto en fachada se consideran los factores de emisión, propagación y la morfología urbana que se pretenden estudiar. Se llevan a cabo mediciones simultáneas con dos sonómetros, uno para la posición de fachada y otro para la posición de referencia. La posición de referencia es fija para el edificio y la posición de fachada daba vueltas en la silueta del edificio. Ambos tienen micrófonos de media pulgada con sus respectivas pantallas anti-viento y miden el nivel sonoro continuo equivalente ponderado A $L_{Aeq,1s}$.

El micrófono de referencia, como se observa en la Figura 21, se coloca de acuerdo con el criterio que menciona la norma ISO 20906. Esta norma establece que para medir el ruido de aviación es necesario situar el micrófono a una altura mínima de 6m sobre el suelo para minimizar la influencia de las reflexiones con el suelo y en un radio de 10m sin superficies reflectantes o cualquier otro elemento que pueda contaminar la medición. En esta tesis el criterio de medición de ruido de aviación establecido en la norma ISO 20906 se utiliza para colocar el micrófono de referencia. Mientras que las mediciones en fachada son llevadas a cabo con un micrófono colocado a 2m de la fachada y a una altura de 4m sobre el suelo. Se han utilizado estas distancias y alturas porque de acuerdo con el Anexo B de la norma ISO 1996-2 a la distancia de 2m de una superficie reflectante es posible observar los fenómenos de onda mediante los niveles medidos. Mientras que a la altura de 4m sobre el suelo se hacen estudios acústicos para evaluar el ruido ambiental en Europa. En este estudio las mediciones en fachada se hacen a dos alturas distintas, mismas en las que se encontraban las ventanas de las dos plantas de cada edificio. Dichas mediciones se realizaron con dos micrófonos, uno a una altura de 1,5m y otro entre las alturas de [4-6,6]m sobre el suelo para evaluar

la influencia de la altura sobre los niveles de ruido en fachada. En ese caso los micrófonos de fachada se colocan como se muestra en la Figura 23.

Figura 21. Posiciones de micrófonos de referencia y fachada

Figura 22. Ejemplo de micrófono de referencia

Figura 23. Configuración de los micrófonos de fachada a 1,5m y 4,0-6,6 m sobre el suelo

2.2.1.2 SELECCIÓN DE ESCENARIOS

Para poder evaluar la influencia de los factores de estudio fue necesario buscar localizaciones donde hubiese exposición al ruido de aviación cerca del aeropuerto. El nivel de ruido de cada evento debía ser notable sobre el ruido de fondo y era necesario que las ubicaciones contaran con las variables de interés (topología de calle, ángulo de vista, ángulo de *slant* y distintos tipos de vuelo) para la realización de esta tesis. A continuación, se muestran una serie de consideraciones que se tomaron en cuenta para cada variable antes de elegir los sitios donde se llevaron a cabo las mediciones.

Las locaciones deben ser aquellas donde los mapas estratégicos de ruido muestren niveles L_d y L_e superiores a 60 dBA que permitan discriminar los eventos sobre el ruido de fondo. Los aviones siguen trayectorias de vuelo fijas en determinadas direcciones que generan diferentes ángulos β con cada fachada de un edificio. Por eso, en cada locación las mediciones son realizadas en fachadas orientadas diferentemente hacia la trayectoria de vuelo. Esto se hace con la intención de cubrir la mayor cantidad posible de escenarios para generar un estudio representativo sobre los efectos de las variables de interés. Es necesario que el ruido producido por los aviones sea notable en los inmuebles donde se mide. Además, los puntos de medición deben estar ubicados en edificios con una situación geográfica adecuada con respecto a las trayectorias de vuelo.

Las mediciones en fachada fueron realizadas en edificios cercanos a las trayectorias de vuelo para que los eventos de ruido fuesen notables sobre el ruido de fondo. Como cada fachada contaba con una orientación determinada hacia cada trayectoria de vuelo esto proporcionaba libertad para obtener la mayor cantidad posible de ángulos de vista en un solo sitio. Como se observa en la Figura 24, al realizar mediciones en varias fachadas de un solo edificio se podían obtener una gran cantidad de ángulos de vista. Las fachadas donde se realizaran las mediciones debían ser planas y no debían contar con elementos que pudiesen provocar más fenómenos de onda contaminando las mediciones como tejados o cualquier obstáculo que pudiese modificar la incidencia de las ondas acústicas.

Figura 24. Fachadas de un edificio con diversidad de ángulos de vista β observados desde planta (izquierda) y alzado (derecha)

Como se muestra en la Figura 25, también se evaluó el comportamiento de las ondas sonoras en topologías de calle con distintas líneas de vista. Se puede esperar que cuando una fachada tenga línea de vista, reciba el campo incidente y el producido por reflexiones. Mientras que cuando una fachada no tenga línea de vista se puede esperar que reciba solamente el campo producido por fenómenos de onda como difracción. El realizar mediciones de ruido de aviación en varias fachadas de un mismo edificio cuando se tienen inmuebles a su alrededor permite obtener eventos de ruido de aviación en distintas topologías de calle con diversos casos de línea de vista.

Figura 25. Topologías U y L con transmisiones directa e indirecta.

Para evaluar los ángulos de *slant* se buscan trayectorias de vuelo que pasen a distintas distancias de *slant* [20-2000]m y altitudes [500-1000]m respecto a las zonas donde se concentran los edificios en los que se llevan a cabo las mediciones. Así se obtienen diversas distancias de *slant* y altitudes de todos los eventos de ruido de aviación y se analiza su influencia sobre los niveles de ruido medidos. Como se observa en la Figura 26, la realización de mediciones de ruido de aviación con ángulos de *slant* variados permite observar cómo se comportan las ondas acústicas a medida que van cambiando los ángulos de *slant*.

Figura 26. Vuelos con distintos ángulos de *slant*

Las mediciones se realizan buscando escenarios como los planteados para los ángulos de vista β , de *slant* γ y topologías de calle tanto para aterrizajes como para despegues. Para poder analizar distintos tipos de vuelo es necesario observar la configuración de vuelos de cada aeropuerto. Una vez observada dicha configuración se realizan mediciones en sitios variados que cuenten con los factores de estudio mencionados y permitan registrar despegues y aterrizajes. Una combinación de todos estos factores de estudio permite cubrir la mayor cantidad de escenarios en los que se presenta el ruido de aviación y realizar un modelo que sea representativo de la propagación del ruido de aviación en entornos urbanos diversos.

2.2.1.3 MEDICIONES

Las locaciones deben contar con zonas adecuadas para ubicar una posición de referencia. La posición de referencia ideal es la azotea del edificio en cuestión por ser un lugar donde hay línea de vista y por minimizar la presencia de obstáculos y superficies reflectantes. Sin embargo, cuando no es posible colocar el micrófono en la azotea, se coloca el micrófono delante del edificio a una distancia de al menos 10m de la fachada y a una altura de 6m sobre el suelo con línea de vista hacia la trayectoria de vuelo. Las condiciones de seguridad deben cumplirse para evitar deterioro o robo de los equipos así como deben ser colocados en zonas donde no representen riesgos para los técnicos o la gente presente al momento de realizar las mediciones. Las condiciones climáticas deben ser normales, ya que situaciones climáticas adversas como lluvia o viento impiden obtener resultados fidedignos.

Las mediciones fueron realizadas durante dos campañas que se llevaron a cabo en momentos distintos. La primera campaña de mediciones fue realizada durante los meses de Julio, Septiembre y Octubre de 2014. Los sitios donde se llevaron a cabo las mediciones de esa primera campaña fueron Coslada y Mejorada del Campo. Posteriormente, gracias a la colaboración establecida con el

Consejo Nacional de Investigación de Italia en la ciudad de Pisa se realizaron mediciones durante dos semanas. Finalmente, durante los meses de septiembre y octubre de 2017 y enero y febrero de 2018 se llevó a cabo una segunda campaña de mediciones en las ciudades de Algete, San Sebastián de los Reyes y Mejorada del campo. Fueron llevadas a cabo dos campañas de mediciones debido a que en la primera campaña por la dispersión encontrada en las rutas de aviación, la posición de referencia no era adecuada para todas las trayectorias. Por eso, algunas de esas trayectorias fueron descartadas y fue necesario realizar más mediciones. En la segunda campaña se encontraron posiciones de referencia más adecuadas en las ubicaciones donde fueron llevadas a cabo y además se encontraron más ángulos de vista que permitieron hacer un análisis más preciso mediante regresión lineal de la influencia del ángulo de vista sobre la propagación del ruido de aviación. Todas las localizaciones donde se llevaron a cabo las mediciones contaban con niveles de ruido superiores a 60 dBA según información de los informes de impacto acústico de los aeropuertos de Madrid y de Pisa [57, 58].

En ambas campañas con la autorización de los respectivos ayuntamientos de cada inmueble, se llevaron a cabo las campañas de mediciones. Con la autorización del personal que dirige las actividades de dicha biblioteca se procedió a realizar las mediciones. Todas las ubicaciones de mediciones contaban con facilidades de acceso y características necesarias de la investigación con relación a la topología de calle y distintos ángulos de vista y *slant*. La posición de referencia no fue posible colocarla en la azotea en la mayoría de los sitios porque las autoridades del inmueble no lo permitían.

Para obtener información sobre las rutas de vuelo en Madrid, el mapa interactivo de ruido Webtrak del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas fue utilizado. En el caso del aeropuerto Galileo Galilei de Pisa, se tenía acceso a las señales de los datos ADS-B, que son señales emitidas segundo a segundo por el transpondedor de las aeronaves para identificarlas y determinar su posición [59]. Gracias a la colaboración establecida con el personal del Consejo Nacional de Investigación (CNR por sus siglas en italiano) de Italia y la Agencia Regional para la Protección Ambiental de la Toscana (ARPAT por sus siglas en italiano) se recuperó la información de cada vuelo. Los vuelos medidos en Mejorada del campo y Coslada fueron aterrizajes, mientras que en San Sebastián de los Reyes, Algete y Pisa fueron despegues. Una vez obtenidos los datos, fueron procesados por medio de software como Evaluator Type 7820 de Brüel & Kjaer y dBTrait de 01dB [60, 61, 62].

A continuación, se mencionan los sitios seleccionados para el estudio:

- CEIP San Esteban (Coslada, Madrid, España)
- Colegio Público Henares (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Pablo Picasso (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Jarama (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Europa (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Colegio Público Miguel de Cervantes (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Casa de la Cultura (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Biblioteca Municipal (Mejorada del Campo, Madrid, España)
- Viviendas (San Sebastián de los Reyes, Madrid, España)
- Viviendas (Algete, Madrid, España)
- Biblioteca SMS (Pisa, Italia)

2.2.1.4 LOCALIZACIONES DE MEDICIONES PARA LA PRIMERA CAMPAÑA

Las mediciones de la primera campaña fueron llevadas a cabo en las ciudades de Madrid y Pisa. El aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid Barajas cuenta con una gran cantidad de tráfico y operaciones diarias que provocan ruido en sitios aledaños. Los sitios para llevar a cabo las mediciones fueron elegidos a partir de información de mapas estratégicos de ruido de AENA y se consideran aquellos sitios que presenten niveles de ruido L_d y L_e superiores a 60 dBA para que sean discernibles sobre el ruido de fondo. Como se observa en la Figura 27, Mejorada del Campo y Coslada son ciudades cercanas al aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid Barajas y de acuerdo con información del mapa de ruido, son localidades con exposición al ruido de aviación. En el caso de Pisa, como se observa en la Figura 28, el aeropuerto internacional Galileo Galilei se encuentra en el interior de la ciudad y también cuenta con operaciones diarias que provocan altos niveles de ruido de aviación en sitios cercanos.

2.2.1.5 LOCALIZACIONES DE MEDICIONES PARA LA SEGUNDA CAMPAÑA

Las mediciones de la segunda campaña fueron llevadas a cabo en la ciudad de Madrid. El aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid Barajas cuenta con una gran cantidad de tráfico y operaciones diarias que provocan ruido en sitios aledaños. Los sitios para llevar a cabo las mediciones fueron elegidos a partir de información de mapas estratégicos de ruido de AENA y se consideran aquellos sitios que presenten niveles de ruido L_d y L_e superiores a 60 dBA. Como se observa en la Figura 29, Mejorada del Campo, San Sebastián de los Reyes y Algete son ciudades cercanas al aeropuerto de Adolfo Suárez Madrid Barajas y de acuerdo con información del mapa de ruido, son localidades con eventos de ruido de aviación con altos niveles de presión sonora.

Figura 29. Trayectorias de vuelo de aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas y ubicaciones para la segunda campaña de mediciones

2.2.2 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

2.2.2.1 PROCESADO DE DATOS

La norma ISO 20906 establece un criterio para obtener el nivel sonoro de un evento de ruido de aviación. Dicho criterio menciona que se debe realizar la integración en el tiempo de aquellos eventos que muestren una diferencia de 10 dBA desde el pico de la forma de onda hasta el ruido de fondo como se observa en la Figura 30. Gracias a anotaciones de campo se pudieron eliminar los efectos de otras fuentes de ruido y los eventos de aviación fueron discriminados. Esto se hace con la intención de reducir la incertidumbre en la detección de eventos que mencionan Asensio *et al*

(2012) [63]. Los niveles calculados son llamados $L_{AEreferencial}$ y $L_{AEfachada}$, mismos que representan los niveles de exposición sonora del i-ésimo evento medido en las posiciones de referencia y fachada respectivamente. Posteriormente, son clasificados en función de la topología de calle, ángulos de vista β , $slant$ y tipo de vuelo.

Figura 30. Esquema de adquisición de datos.

2.2.2.2 PROCESADO ESTADÍSTICO DE DATOS

El procesado estadístico de datos consiste en realizar análisis estadísticos como t-student, Welch, Kruskal Wallis o Regresión Lineal para las muestras recolectadas en todos los sitios con el fin de observar el impacto de cada variable sobre los niveles de inmisión. Dichos análisis estadísticos fueron llevados a cabo con la herramienta informática estadística SPSS [64]. Cada análisis fue llevado a cabo con la intención de determinar el impacto de cada variable sobre la propagación del ruido de aviación. A continuación, se detalla la importancia de cada análisis junto con consideraciones que fueron necesarias antes de llevar a cabo las mediciones.

2.2.2.2.1 Análisis estadístico de variaciones de ruido a lo largo de la fachada

Un edificio cercano a una trayectoria de vuelo está expuesto a altos niveles de ruido. Sin embargo, algunas de sus fachadas tendrán mayor línea de vista con respecto a las otras hacia la fuente de

ruido. Además, algunas de sus fachadas pueden formar una topología de calle U con la fachada de algún edificio vecino. Lo cual significa que habrá más superficies reflectantes y con ello se esperaría tener niveles de ruido más altos. Por eso, es de interés observar las variaciones de ruido por edificio ya que cada fachada cuenta con una orientación distinta hacia las trayectorias de vuelo y puede formar distintas topologías de calle.

Para determinar las variaciones de ruido a lo largo de la fachada, durante distintos días, se realizaron mediciones alrededor del contorno de cada edificio en distintas posiciones. Una vez medidos los niveles de ruido, se calculó el nivel de exposición sonora de cada evento observando que desde el nivel pico hubiese una diferencia de 10 decibelios sobre el ruido de fondo como lo establece la norma ISO 20906. Al momento de realizar las mediciones, en función del inmueble del que se tratara había actividades diarias que provocaban altos niveles de ruido. Algunos eventos no eran discernibles sobre el ruido de fondo. Es decir, no se podía encontrar una diferencia de 10 decibelios desde los picos de las formas de onda sobre el ruido de fondo y por lo tanto, fueron descartados. Mientras se realizaban las mediciones, se tomaron notas para quitar los efectos de otras fuentes de ruido al momento de procesar los datos medidos.

Los edificios reducen el ángulo de vista especificado en la norma ISO 20906 al acotarlo. Las trayectorias observadas en cada sitio formaban ángulos de vista con las fachadas donde se llevaron a cabo las mediciones. La casuística proporcionada por los sitios de medición y los escenarios en los que se realizaron las mediciones resultaron en siete ángulos de vista como se muestran en la Figura 31. En este análisis, los ángulos de vista fueron tratados como categorías discretas en las que se agrupaba cada evento medido.

Figura 31. Ángulos de vista β obtenidos.

Por otro lado, las topologías de calle también modificaban los ángulos de vista de distintas maneras. En el caso de las topologías U, como se observa en la Figura 32, cuando un edificio se encontraba entre la trayectoria de vuelo y el punto de medición, el ángulo de vista era modificado. Las topologías de calle en conjunto con la geometría fuente-receptor modifican la incidencia de las ondas sonoras, resultando en distintos ángulos de vista. Como se observa en la Figura 33, si la altitud del vuelo es lo suficientemente grande en una topología U, puede haber una línea de vista entre la trayectoria de vuelo y el punto de medición.

Figura 32. Ángulo de vista modificado por topología U

Figura 33. Ángulo de vista β modificado por altitud en topología U.

Mediante el cálculo manual de los ángulos de vista se observa que a medida que se reducen, una menor cantidad de la trayectoria de vuelo estará en transmisión directa con el punto de medición. Cuando se mide un evento de ruido de aviación, hay fracciones de la trayectoria de vuelo que en transmisión directa con el punto de medición registrarán mayores niveles de ruido con respecto al resto de la trayectoria. De acuerdo con la norma ISO 20906, un punto donde normalmente se

encuentra el pico de la forma de onda de un evento de ruido de aviación es la distancia de *slant*. Existen ángulos de vista donde la transmisión ya no es directa a la distancia de *slant*. Comenzando por el ángulo de 180° (o 2ω según ISO 20906), donde hay transmisión directa para todo el segmento de la trayectoria del avión que pasa frente al punto de medición, si el ángulo se reduce, será a partir de un ángulo de vista de 45° que dejará de haber transmisión directa a la distancia de *slant*. Tal y como se observa en la Figura 34, cuando se tiene un ángulo de vista de 45° con respecto a un punto de medición en la fachada de un edificio, a la distancia de *slant* la transmisión ya no será directa. Por lo tanto, se tratará de un evento con fachada sombra. Mientras que cuando se tenga un ángulo de vista superior a 45° , se tratará de un evento con fachada expuesta. Por eso, se hace un análisis para topologías de calle con fachadas expuestas y sombra. El objeto de dicho análisis es determinar si la presencia de obstrucciones con distintas topologías de calle a la distancia de *slant* representa un cambio significativo de los niveles de ruido en fachada.

Figura 34. Transmisión de ruido de aviación a 45°

Con todas estas consideraciones, se hace un análisis de las variaciones de los niveles de ruido en fachada con respecto a una referencia en función de la topología de calle y el tipo de fachada (expuesta/sombra). Para llevar a cabo este análisis es necesario comparar los niveles de ruido medidos por fachada con el nivel promedio de ruido de aviación en fachada que se registra en un inmueble. El nivel medio de ruido en fachada medido en cada edificio fue utilizado como la referencia a la que se le restaban los niveles de cada evento de ruido medido en fachada.

Los eventos de ruido fueron clasificados en topologías de calle con fachadas sombra y expuestas. Con este análisis se pretende demostrar el supuesto de que en una calle U con una fachada expuesta se esperaría obtener un nivel de ruido en fachada superior al que se obtendría en una calle L con una fachada expuesta. Es decir, se pretende demostrar si una fachada de un edificio es más ruidosa que otra según sus características de ángulo de vista y topología de calle por medio de pruebas estadísticas como t-student o Kruskal Wallis.

2.2.2.2.2 Análisis estadístico de la influencia de fachadas expuestas y sombra sobre el ruido en condiciones de campo libre

El ruido de aviación es complejo porque cada evento de aviación cuenta con características propias como altitud, distancia horizontal y el espectro de cada aeronave. Todos estos factores hacen que cuando se lleve a cabo la campaña de mediciones de ruido de aviación se tengan niveles de ruido distintos en una misma posición. Por eso, para eliminar la influencia individual de cada uno de los eventos es necesario contar con una posición de referencia en condiciones de campo libre como lo establece el Anexo B de la norma ISO 1996-2. En dicha posición de referencia se mide el nivel de presión sonora producido por cada aeronave sin obstrucciones y minimizando la influencia de las reflexiones con el suelo. Además, los niveles de ruido que se miden en la posición de referencia son los que se utilizan normalmente para realizar un diagnóstico del nivel de ruido al que se encuentra expuesta una región. Mediante un análisis estadístico de las mediciones realizadas en fachadas expuestas y sombra se propone un método de cálculo de los niveles de ruido en condiciones de referencia a partir de unas correcciones calculadas.

Mediante los cálculos manuales de los ángulos de vista se ha observado que conforme se reduce el ángulo de vista, menores fracciones de las trayectorias de vuelo están en transmisión directa. En particular, hay un ángulo de vista con el que es notoria la atenuación y es el de 45° . Dentro de este ángulo, la transmisión entre la fracción normalmente más ruidosa de la trayectoria de vuelo, que contiene a la distancia de *slant*, y el punto de medición es obstruida. Esto resulta en una atenuación de los niveles de ruido ya que no se cuenta con línea de vista entre el punto de medición y la la trayectoria de vuelo a la distancia de *slant*. Tomando en cuenta este criterio se clasifican los eventos con ángulos de vista menores a 45° como fachadas sombra y los mayores a 45° como fachadas expuestas.

Por eso, se lleva a cabo un análisis donde en cada localización se buscan las mejores posiciones de referencia. Dichas posiciones generalmente se ubican a 10 m de los edificios en lugares sin obstrucciones y a 7m de altura sobre el suelo. El objeto de este análisis es obtener factores de corrección para los niveles de ruido medidos en fachadas sombra y expuestas que permitan obtener valores comparables a los niveles que se miden en una posición de referencia.

2.2.2.2.3 Regresión lineal de la influencia de la morfología urbana sobre la propagación del ruido de aviación

En los entornos urbanos la propagación del ruido de aviación se ve modificada por diversos factores que normalmente se encuentran presentes. La presencia de edificios modifica los tipos de calle, generando diferentes concentraciones de ondas sonoras que dan origen a diversos niveles de presión sonora. Los edificios modifican la propagación al generar atenuaciones o amplificaciones de los niveles de ruido. La geometría fuente-receptor también juega un papel importante porque la posición del avión con respecto a una fachada puede significar un incremento en los decibelios medidos. Todas estas variables están presentes en un entorno urbano y modifican los niveles de presión sonora.

Para evaluar la influencia de cada una de estas variables, es necesario realizar las mediciones en ubicaciones con exposición al ruido de aviación, es decir, lugares donde los niveles L_d , L_e sean iguales o superiores a 60 dBA. Para eso, se buscan localidades en los mapas de ruido que muestren altos niveles de ruido. Posteriormente, es necesario observar en cada localidad la mayor cantidad posible de inmuebles con distintas topologías de calle, ángulos de vista y ángulos de *slant*. Todo esto se hace con la intención de cubrir la mayor cantidad posible de escenarios que permita caracterizar de manera certera el comportamiento del ruido de aviación en un entorno urbano.

Es necesario también tener una posición de referencia adecuada para cada localidad. La posición de referencia debe ser un sitio donde se reciban los niveles de presión sonora con la menor cantidad de reflexiones y obstrucciones posibles. Debe cumplir con los requisitos establecidos en el Anexo B de la norma ISO 1996-2, los cuales son que esté libre de obstáculos en un radio de 10m y debe estar a una altura mínima de 6m sobre el suelo. Cada ubicación tiene su respectiva posición de referencia porque las trayectorias de vuelo nominales pasan diferentemente cerca de cada una de ellas. Cada evento de ruido medido en fachada debe tener su respectivo valor en condiciones de referencia para observar cómo son modificados los niveles de ruido con respecto a campo libre y para reducir la influencia individual de cada vuelo.

Una vez que son realizadas las mediciones, cada uno de los eventos debe ser clasificado en función de su topología, ángulo de vista y ángulo de *slant*. Posteriormente se les hacen las pruebas estadísticas (t-student, Kruskal-Wallis) que demuestran si cada una de las variables es un factor de influencia sobre la propagación del ruido de aviación. Después se hace un análisis de regresión lineal donde se observa qué tipo de relación existe entre el nivel de ruido medido en fachada, el nivel de ruido medido en la referencia, la topología de calle, el ángulo de vista y el ángulo de *slant*.

2.2.2.2.4 Regresión lineal para los efectos del ángulo de *slant* γ sobre el factor de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2

El Anexo B de la norma ISO 1996-2 menciona una posición de referencia para medir el ruido producido por una fuente extendida con un ángulo de vista mínimo de 60°. También considera la presencia de superficies reflectantes verticales que modifican los niveles de ruido en condiciones de referencia. Cuando se presenta el caso de una superficie vertical reflectante que se encuentra a una distancia dentro del rango de [0,5-2]m del micrófono, se recomienda la aplicación de un factor de corrección de 3 dBA. Este factor de corrección ha sido estudiado ampliamente para el ruido de tráfico, pero no para el ruido de aviación. En el caso del ruido de aviación, la geometría fuente-receptor se ve modificada dado que el avión, a pesar de que se trata de una fuente extendida, cuenta con una altitud que modifica la incidencia de las ondas sonoras. Dicha altitud, en conjunto con la distancia horizontal perpendicular más corta o distancia de *slant*, dan origen al ángulo de *slant*. Este análisis pretende desarrollar un modelo que permita extrapolar los niveles de presión sonora producidos por un avión en condiciones de referencia considerando el ángulo de *slant* y el tipo de vuelo.

Para desarrollar este modelo es necesario medir el ruido de aviación en ubicaciones donde L_e y L_d sean mayores a 60 dBA. Con información de los mapas de ruido se buscan localidades con altos niveles de presión sonora. En cada ubicación, se buscan inmuebles que cuenten con un ángulo de vista superior a 60° y con distintos ángulos de *slant*. La mayor cantidad posible de ángulos de *slant* debe ser cubierta para poder caracterizar de manera adecuada el comportamiento de las ondas sonoras cuando se cumplen las condiciones establecidas en el Anexo B de la norma ISO 1996-2.

Cada localidad debe contar con un lugar adecuado para la posición de referencia. Es decir, una posición donde haya exposición a las trayectorias de vuelo con la menor cantidad posible de reflexiones y obstrucciones. De ser posible, el micrófono de referencia debe ser colocado en la azotea del edificio. De lo contrario, se coloca a 10 metros de la fachada donde se llevan a cabo las mediciones y a una altura mínima de 6 metros sobre el suelo. Cada evento se mide simultáneamente tanto en posición de fachada como en la posición de referencia, esto se hace para reducir la influencia individual de cada vuelo sobre los niveles de ruido medidos en fachada y para observar cómo son modificados los niveles de ruido con respecto a la referencia.

Una vez que se llevan a cabo las mediciones, los datos de los eventos de ruido medidos son adquiridos e identificados en función de su ángulo de *slant* y tipo de vuelo. Mediante pruebas estadísticas como t-student y Kruskal Wallis se determina si las variables incluidas en el análisis

son factores de influencia. Posteriormente, se hace un análisis de regresión lineal que permite observar qué relación existe entre los niveles de ruido medidos en fachada, los niveles medidos en la referencia, el ángulo de *slant* y el tipo de vuelo.

3. RESULTADOS

Se llevaron a cabo los siguientes análisis:

- Factores de influencia de la morfología urbana sobre los niveles de inmisión provocados por el ruido de aviación
 - Análisis de ruido de aviación a lo largo de la fachada
 - Influencia de fachadas expuesta y sombra sobre el nivel de ruido en condiciones de referencia
- Cuantificación de los efectos de variables de la morfología urbana en la propagación del ruido de aviación
 - Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos
 - Efectos del ángulo de *slant* γ sobre el factor de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2

Como resultado del procesamiento de los datos, se obtuvo una base de datos donde se clasificó cada uno de los eventos en función del tipo de calle con la que contaba, ángulo de vista, ángulo de *slant* y tipo de vuelo como se muestra en la Figura 35.

Fecha	Ref	RefSEL	Duración	Sonómetros	SSEL	Duración1	Delta	Vista	Disthor	Altitud	Slant	Topología
03/09/2014 09:59:19 a.m.	70.1	85,40	0:00:34	68.9	85,00	0:00:41	-,40	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:01:26 a.m.	64.5	80,00	0:00:36	62.7	79,90	0:00:52	-,10	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:01:26 a.m.	64.5	80,00	0:00:36	66	81,50	0:00:36	1,50	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:03:54 a.m.	64.7	80,50	0:00:38	65.5	81,20	0:00:37	,70	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:06:33 a.m.	69	86,40	0:00:55	69.2	86,10	0:00:48	-,30	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:06:33 a.m.	69	86,40	0:00:55	71.7	88,00	0:00:43	1,60	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:08:37 a.m.	71.8	87,90	0:00:41	70.7	87,40	0:00:47	-,50	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:08:37 a.m.	71.8	87,90	0:00:41	70.6	86,20	0:00:36	-1,70	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:25:03 a.m.	68.2	82,90	0:00:29	68	82,90	0:00:31	,00	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:25:03 a.m.	68.2	82,90	0:00:29	68.3	83,30	0:00:32	,40	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:27:48 a.m.	68.8	84,10	0:00:34	67.5	83,30	0:00:38	-,80	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:27:48 a.m.	68.8	84,10	0:00:34	68.8	84,10	0:00:34	,00	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:30:00 a.m.	70.3	85,20	0:00:31	68.9	84,60	0:00:37	-,60	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:30:00 a.m.	70.3	85,20	0:00:31	69.8	85,50	0:00:37	,30	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:32:24 a.m.	66.7	82,70	0:00:40	66.5	82,30	0:00:38	-,40	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:32:24 a.m.	66.7	82,70	0:00:40	67.8	82,60	0:00:30	-,10	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:34:43 a.m.	69.7	84,70	0:00:31	67.7	83,80	0:00:41	-,90	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:34:43 a.m.	69.7	84,70	0:00:31	69.8	84,60	0:00:30	-,10	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:36:31 a.m.	65.5	80,80	0:00:34	65.7	80,40	0:00:29	-,40	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:36:31 a.m.	65.5	80,80	0:00:34	66.6	80,60	0:00:25	-,20	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:38:15 a.m.	71.3	87,80	0:00:45	69.4	86,90	0:00:56	-,90	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:38:15 a.m.	71.3	87,80	0:00:45	71.7	87,80	0:00:41	,00	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:40:38 a.m.	65.7	81,20	0:00:35	64.4	81,30	0:00:49	,10	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:40:38 a.m.	65.7	81,20	0:00:35	66.3	81,40	0:00:32	,20	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:42:31 a.m.	70.2	83,80	0:00:23	68.6	83,50	0:00:31	-,30	180	7,12	1050,00	89,00	0
03/09/2014 10:42:31 a.m.	70.2	83,80	0:00:23	69.3	83,50	0:00:26	-,30	180	7,12	1050,00	89,00	0

Figura 35. Captura de pantalla de base de datos de eventos de ruido.

En los siguientes apartados, se muestran los estadísticos descriptivos de los niveles de ruido medidos en fachada por ciudad para cada campaña.

Primera campaña

El diagrama de cajas y bigotes de los valores de $L_{AE\ fachada i}$ medidos en la primera campaña de mediciones, se muestra en la Figura 36. Todas las ciudades donde se llevaron a cabo las mediciones de la primera campaña estaban expuestas a aterrizajes. Como se observa en la Figura 36, los niveles más altos de $L_{AE\ fachada i}$ se obtuvieron en Pisa. Esto se debe a que los aviones pasaban muy cerca del punto donde se realizaron las mediciones. En el diagrama de cajas y bigotes se observan algunos datos atípicos, esto se debe a que algunos de los eventos eran producidos por aviones particularmente más ruidosos o silenciosos que el resto. Además, en los análisis que se llevaron a cabo con estos datos mostrados, la inclusión y exclusión de ellos no provocaba cambios significativos en los resultados obtenidos.

Como se muestra en la Tabla 1, en Pisa se cuenta con una desviación estándar de 2,2 dBA, lo cual se debe entre otras cosas, a que las mediciones fueron realizadas en diferentes fachadas del edificio con distintas topologías de calle y ángulos de vista. Por otro lado, en Mejorada del campo se observa una mayor desviación que es cercana a los 3 dBA. En este sitio, las mediciones fueron llevadas a cabo en más de un edificio donde se tenían muchos puntos de medición con distintos ángulos de vista y topologías de calle. Mientras que en Coslada es donde se obtuvo la desviación estándar más pequeña. La dispersión de valores presentes en cada una de las localizaciones se debe a la diversidad de escenarios cubiertos por ciudad. Observando los percentiles, se puede notar que en cada ciudad predomina un valor sobre la mayoría de los eventos medidos siendo de todos ellos el de mayores niveles de ruido en fachada Pisa.

Figura 36. Diagrama de cajas y bigotes de niveles $L_{AE} \text{ fachadai}$ por ciudad de la primera campaña de mediciones

Figura 37. Histograma de valores totales de $L_{AE} \text{ fachadai}$ de la primera campaña de mediciones

Ciudad	Número de eventos	Media [dBA]	Desviación estándar [dBA]	Mediana [dBA]
Coslada	121	84,7	1,9	84,9
Mejorada del Campo	1465	82,4	2,9	82,5
Pisa	94	87,4	2,2	87,6

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachada}$ por ciudad en la primera campaña

Percentil [dBA]							
$L_{AE\ fachada}$							
Ciudad	5	10	25	50	75	90	95
Coslada	81,3	82,2	83,4	84,9	86	87	88,4
Mejorada del Campo	77,5	78,4	80,4	82,5	84,6	86,2	87,1
Pisa	83,2	83,9	86,0	87,6	89,1	90,1	90,4

Tabla 2. Percentiles de $L_{AE\ fachada}$ por ciudad en la primera campaña

Segunda campaña

En el diagrama de cajas y bigotes de la segunda campaña mostrado en la Figura 38, se observan los valores alrededor de los cuales oscilan los niveles de ruido medidos en fachada. San Sebastián de los Reyes muestra una media mayor con respecto al resto de las ciudades. Mejorada del Campo muestra la desviación estándar más grande y Algete muestra la más pequeña. En el diagrama de cajas y bigotes se observan algunos datos atípicos. La presencia de estos datos se debe a que había algunos aviones que eran particularmente más silenciosos y ruidosos que el resto. Sin embargo, su inclusión/exclusión de los análisis no provocaba cambios significativos en los resultados obtenidos.

En Algete los sitios donde se llevaron a cabo las mediciones eran muy similares, todos poseían la misma topología de calle y ángulos de vista semejantes. En San Sebastián de los Reyes se llevaron a cabo las mediciones en más ubicaciones con distintas características y eso llevó a una gran diversidad de niveles de ruido medidos en fachada. Sin embargo, algo que es importante remarcar es que a pesar de que las ubicaciones de San Sebastián de los Reyes y Algete estaban expuestas a distintas rutas de despegue. Mientras que en Mejorada del Campo todas las rutas medidas eran aterrizajes. Esta puede ser una de las razones por las que los niveles medidos en fachada entre estas dos ciudades y Mejorada del Campo son significativamente distintos. Los percentiles mostrados en

la Tabla 4 muestran que los niveles de ruido en fachada más altos para el 95% de los datos medidos se encontraron en San Sebastián de los Reyes.

Figura 38. Diagrama de cajas y bigotes de $L_{AE\ fachada i}$ por ciudad en la segunda campaña de mediciones

Figura 39. Histograma de $L_{AE\ fachada i}$ total para segunda campaña de mediciones

Ciudad	Número de eventos	Media [dBA]	Desviación estándar [dBA]	Mediana [dBA]
Algete	52	79,6	1,6	79,8
Mejorada del Campo	361	81,0	2,8	81,1
San Sebastián de los Reyes	443	82,2	2,5	82,0

Tabla 3. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachada i}$ por ciudad para segunda campana de mediciones

Percentil [dBA] <i>$L_{AE\ fachada i}$</i>							
Ciudad	5	10	25	50	75	90	95
Algete	76,5	77,5	78,6	79,8	80,4	81,6	82,6
Mejorada del Campo	76,1	77,3	79,1	81,1	83,1	84,5	85,6
San Sebastián de los Reyes	78,4	79,0	80,3	82,0	84,1	85,7	86,3

Tabla 4. Percentiles de $L_{AE\ fachada i}$ por ciudad para segunda campaña de mediciones

En los siguientes apartados, se muestran los resultados de cada análisis realizado.

3.1 FACTORES DE INFLUENCIA DE LA MORFOLOGÍA URBANA SOBRE LOS NIVELES DE INMISIÓN PROVOCADOS POR EL RUIDO DE AVIACIÓN

3.1.1 Análisis de ruido a lo largo de la fachada

Los edificios cercanos a trayectorias de vuelo se encuentran expuestos a altos niveles de presión sonora. Los eventos de ruido a los que se exponen los edificios ocurren de manera periódica. Por lo tanto, un inmueble cercano a un aeropuerto estará expuesto a un nivel de ruido promedio en torno al cual oscilarán los niveles de ruido en fachada. Por eso, para calcular las variaciones de cada evento de ruido por edificio se calculó la media aritmética del ruido medido en cada inmueble con las mediciones realizadas alrededor del contorno del edificio durante distintos días. Dicho valor es expresado en la Ecuación 8 como $L_{AE\ Ed_x\ promedio}$ y representa el nivel medio de ruido medido en fachada para el x-ésimo edificio ocasionado por sus n eventos. Ese valor fue utilizado como una

referencia, a la que se le restaba el nivel del i-ésimo evento medido en fachada obteniendo valores positivos y negativos como se observa en la Ecuación 9. Esos valores indican un nivel en fachada menor y mayor al nivel de ruido $L_{AE\ Ed_x\ promedio}$ respectivamente. La influencia de cada variable sobre $\Delta L_{AE\ fachadai}$ fue evaluada mediante pruebas de estadística inferencial como t-student, Welch o Kruskal Wallis para observar si las variables modifican los niveles de ruido significativamente.

$$L_{AE\ Ed_x\ promedio} = \frac{\sum_i^n L_{AE\ fachadai}}{n} \quad [8]$$

$$\Delta L_{AE\ fachadai} = L_{AE\ Ed_x\ promedio} - L_{AE\ fachadai} \quad [9]$$

En trece edificios se midió un total de 1680 eventos. En la Tabla 1 se pueden observar los estadísticos descriptivos de todos los eventos medidos en fachada. La desviación estándar al ser de 3 dBA muestra que los eventos medidos están dispersos sobre un amplio rango de valores. La amplia desviación de los datos puede deberse a muchos factores que intervinieron durante la realización de las mediciones. Pero las principales causas que provocan la dispersión, son que cada vuelo es único con sus características propias, no todas las fachadas donde se realizaron las mediciones contaban con línea de vista hacia la trayectoria de vuelo, ni fueron realizadas en topologías de calle iguales, ni en los mismos edificios.

Número de eventos	Media [dBA]	Desviación Estándar [dBA]	Mínimo [dBA]	Máximo [dBA]
1680	82,8	3,0	82,7	83,0

Tabla 5. Estadísticos descriptivos de $L_{AE\ fachadai}$ para análisis de variaciones a lo largo de la fachada

Figura 40. Histograma de $L_{AE\ fachadai}$ totales de análisis de variaciones a lo largo de la fachada.

Figura 41. Diagrama de cajas y bigotes de $L_{AE} \text{ fachada}$ total a lo largo de la fachada.

En la Tabla 6 se muestran los estadísticos descriptivos de los eventos de ruido medidos por edificio. Los sitios donde se realizaron las mediciones fueron en su mayoría escuelas por las facilidades de acceso proporcionadas y porque al contar con varios edificios era posible observar los fenómenos de onda en diversos escenarios. Por eso en la columna Edificio, se observa más de un edificio asociado a cada Localización. Como se puede notar, los diversos escenarios en los que se realizaron las mediciones ocasionan que haya una gran variedad de niveles de ruido por evento y con ello una dispersión en cada edificio. Para observar las variaciones de ruido de aviación generadas en cada edificio se hizo un análisis de dichas variaciones a lo largo de la fachada. Los valores de la columna Media [dBA] fueron utilizados como $L_{AE Ed_x \text{ promedio}}$. Con este valor y el nivel de ruido de cada evento se calculó $\Delta L_{AE \text{ fachada}}$ como se indica en la Ecuación 9. Como se puede notar en la columna Fachadas medidas, no fue posible realizar mediciones en todas las fachadas de cada edificio debido a la presencia de obstáculos u otras superficies que podían provocar fenómenos de onda que contaminaran las mediciones.

Mediciones en fachada									
Localización	Edificio	Fachadas medidas	Fachadas sombra	Fachadas expuestas	Eventos	Min [dBA]	Max [dBA]	Media [dBA]	Desviación Estándar [dBA]
1	1	4	1	3	30	79,1	86,9	83,7	2,5
1	2	4	2	2	47	81,8	86,5	84,3	1,3
1	3	4	2	2	44	80,9	89,8	85,1	2,1
2	4	2	1	1	132	76,2	87,2	81,7	2,4
2	5	2	1	1	227	76,7	88,7	83,2	2,7
2	6	2	1	1	170	79,2	89,4	83,9	2,5
3	7	4	3	1	164	79,0	88,9	84,2	2,6
3	8	4	2	2	104	78,3	89,7	83,2	2,4
4	9	3	0	3	199	72,8	87,0	81,6	2,9
4	10	3	2	1	143	75,8	86,3	81,3	2,9
4	11	3	3	0	92	75,5	86,0	81,4	2,8
5	12	3	1	2	234	74,3	87,7	81,0	2,7
6	13	4	1	3	94	81,8	91,3	87,4	2,2

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de cada edificio medido

Las mediciones fueron realizadas alrededor del contorno de cada edificio en diversas posiciones en todos los sitios de Madrid. Mientras que en Pisa las mediciones también se realizaron alrededor del contorno de la biblioteca pero solamente en una posición por cada fachada. Esto se debe a que el aeropuerto Galileo Galilei de Pisa cuenta con una menor cantidad de vuelos diarios con respecto al aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas. Es decir, en los sitios de Madrid se medía alrededor de 10 eventos por cada posición de fachada en los dos micrófonos durante un horario de 9:00-15:00. Mientras que en Pisa se solían medir alrededor de 10 eventos totales en los dos micrófonos durante el mismo horario en una sola posición. Esto hizo que hubiera limitaciones en cuanto al número de posiciones, pero no impedía que se realizara un análisis de los factores de estudio. Como se observa en la Figura 42, en un edificio en Madrid se colocaban los micrófonos de fachada en diversas posiciones alrededor del contorno. Mientras que en la biblioteca de Pisa se colocaron los micrófonos en una sola posición por fachada.

Figura 42. Posiciones en fachada en edificios de Madrid (izquierda) y Pisa (derecha)

3.1.1.1 Ángulo de vista y Topología de calle

A medida que aumenta el ángulo β hay una mayor fracción del vuelo en transmisión directa. Esto implica que dependiendo de qué tanto bloquee un edificio la transmisión de ondas acústicas será diferente el nivel en fachada y por lo tanto habrá unas fachadas más silenciosas que otras y afectará al nivel interior para un mismo índice de reducción acústica R' . Por otra parte, las distintas topologías de calle inducen diversas reflexiones por contar con una mayor cantidad de superficies reflectantes. Una calle U experimenta más reflexiones que una calle L por contar con dos paredes. Por lo tanto, se puede considerar que una topología de calle U con un gran ángulo β , registrará un mayor valor de nivel de ruido en fachada que una topología de calle L con un ángulo β grande.

Topología de calle	β [°]	Número de Eventos	Media [dBA]	Desviación Estándar [dBA]
L	$\beta < 45^\circ$	436	0,7	2,7
L	$\beta > 45^\circ$	918	-0,3	2,6
U	$\beta < 45^\circ$	194	0,1	2,4
U	$\beta > 45^\circ$	132	-1,0	2,0

Tabla 7. Medias y desviaciones estándar de topología y ángulo de vista

Se evaluaron cuatro casos para observar la influencia de la topología de calle y los ángulos β en la modificación de $\Delta L_{AE \text{ fachada}}$. Estos casos son topología L con ángulos β menores y mayores a 45° , U con ángulos β menores y mayores a 45° . Las medias y desviaciones estándar de cada caso se muestran en la Tabla 7. Las medias de las categorías fueron contrastadas mediante Kruskal-Wallis ya que los datos no venían de distribuciones normales. Con un estadístico Chi cuadrado de 62,734 y un nivel de significación de 0,00 se demuestra que los datos de las cuatro categorías no pertenecen a la misma distribución. Al llevar a cabo contrastes de hipótesis Welch, con la hipótesis nula de si las medias mostradas en la Tabla 7 de cada categoría son iguales, se observaron diferencias significativas entre los ángulos β mayores y menores a 45° , tal y como se muestra en la Tabla 8 para cada topología de calle. Con esto se comprueba que en una topología U con grandes ángulos β habrá mayores niveles de ruido en fachada que en una topología L con el mismo ángulo β debido a la cantidad de reflexiones generadas por contar con más superficies reflectantes.

Topología de calle	β [°]	vs.	Topología de calle	β [°]	t	p-valor
L	$\beta > 45^\circ$		U	$\beta > 45^\circ$	5,308	0,00
L	$\beta < 45^\circ$		U	$\beta < 45^\circ$	4,554	0,00
L	$\beta > 45^\circ$		L	$\beta < 45^\circ$	5,884	0,00
U	$\beta > 45^\circ$		U	$\beta < 45^\circ$	-3,081	0,00
U	$\beta > 45^\circ$		L	$\beta < 45^\circ$	3,876	0,00
U	$\beta < 45^\circ$		L	$\beta > 45^\circ$	2,745	0,00

Tabla 8. Contrastes de hipótesis entre topologías y ángulos de vista

3.1.1.2 Altura de fachadas

La altura de las fachadas era una de las variables cuya influencia sobre la propagación del ruido de aviación era de interés para el estudio. Para evaluar la influencia de la altura de las fachadas sobre la propagación del ruido de aviación el escenario ideal de medición habría consistido en medir en un amplio rango de alturas con igualdad de condiciones. Es decir, medir a distintas alturas en fachadas con la misma línea de vista. Sin embargo, no todas las fachadas donde se llevaron a cabo las mediciones no contaban con la misma línea de vista. Por eso era necesario considerar que la propagación a distintas alturas cambiaría no solamente en función de la altura de la fachada, sino también de la línea de vista. Por eso, se analizó la relación entre las alturas de las fachadas y $\Delta L_{AE\ fachadai}$ para fachadas expuestas y sombra a través de un análisis de regresión lineal.

La mayoría de los edificios donde se realizaron las mediciones eran de dos pisos de altura. Las ventanas de las fachadas en planta baja y primera planta se encontraban normalmente a 1,5m y 4m de altura sobre el suelo respectivamente. Sin embargo, en los diferentes edificios donde se llevaron a cabo las mediciones, la altura de la ventana en la fachada del primer piso variaba entre 4-6,6m. Por lo tanto, las alturas a las que se realizaron las mediciones se dividían en dos grupos, el de la planta baja a 1,5m y el del primer piso dentro de un rango de entre [4,0-6,6]m.

En las fachadas expuestas, se midieron 498 eventos a 1,5m y 478 eventos entre 4 y 6,6m. Se evaluó la linealidad entre $\Delta L_{AE\ fachadai}$ y la altura de las fachadas expuestas. Para ello se calculó la correlación de Pearson entre $\Delta L_{AE\ fachadai}$ y las Alturas, obteniendo un valor de -0,002. Dicho coeficiente indica que no hay una relación lineal entre ambas variables. Esto quiere decir que a las alturas en las que se realizaron mediciones no se registran cambios significativos en los niveles de ruido medidos en fachadas expuestas. En las fachadas sombra se midieron 371 eventos a la altura de

1,5m y 334 eventos a las alturas de entre 4 y 6,6m. Una vez clasificados los eventos en función de sus alturas se evaluó el supuesto de linealidad. Para ello se calculó la correlación de Pearson obteniendo un valor de 0,047, dicho valor indica que no hay una relación lineal entre ambas variables. Esto significa que a las alturas a las que fueron realizadas las mediciones no se registran cambios notables en los valores de $\Delta L_{AE\ fachada i}$.

Como se puede observar con los resultados de dichas correlaciones, no hay una relación lineal que se pueda establecer entre los niveles de ruido y las alturas de las fachadas en este estudio. Una de las razones por las que esto sucede es que la casuística observada no constituye una muestra representativa de lo que sucede a distintas alturas con el ruido de aviación en una fachada. Para observar los efectos de las alturas de las fachadas sobre la propagación del ruido de aviación, se necesita un rango más amplio de alturas que permita cuantificar el efecto del aumento de cada metro de altura sobre los niveles de ruido en fachada y esto no fue posible en las localizaciones bajo estudio.

3.1.2 Influencia de fachadas expuesta y sombra sobre el nivel de ruido en condiciones de referencia

Para observar la variación de los niveles de ruido en fachada con respecto a los medidos en una referencia se llevó a cabo un análisis en función del tipo de fachada expuesta/sombra. La diferencia entre los niveles $L_{AE\ referencia i}$ y $L_{AE\ fachada}$ fue calculada como se muestra en la Ecuación 10.

$$\Delta L_{AEi} = L_{AE\ referencia i} - L_{AE\ fachada i} \quad [10]$$

Donde ΔL_{AEi} representa la diferencia entre los niveles de ruido en referencia y fachada del i-ésimo evento. Al calcular la diferencia de niveles se obtienen valores de ΔL_{AEi} positivos y negativos, mismos que representan niveles de ruido en referencia mayores y menores a los medidos en fachada respectivamente. A la variable ΔL_{AEi} se le aplicó un contraste de medias tipo t-student con el factor de estudio fachadas expuesta/sombra. Con este análisis se pretende determinar si una fachada expuesta/sombra representa un factor estadísticamente significativo dentro de la propagación del ruido de aviación en entornos urbanos. Es decir, determinar si en una fachada con línea de vista hacia una trayectoria de vuelo se generan niveles de ruido mayores a los que se generarían en una fachada dentro de una zona sombra.

Debido a la dispersión de las rutas, hubo que descartar algunos eventos debido a que la posición de referencia no era adecuada. Por lo tanto, en los sitios donde se contó con una referencia adecuada se llevaron a cabo mediciones obteniendo un total de 627 eventos cuyo histograma total de los

niveles $L_{AE\ fachadai}$ se observa en la Figura 43. Los ángulos de vista β fueron calculados manualmente a partir de las trayectorias de vuelo reales y de la orientación del edificio con una resolución aproximada de entre $[15^\circ-20^\circ]$, siendo los ángulos encontrados los siguientes: 0° , 20° , 45° , 60° , 90° , 120° , 180° . A través de aproximaciones se determinó que conforme el ángulo de vista se reduce y llega a 45° la transmisión entre fuente y receptor deja de ser directa a la distancia de *slant*. Por lo tanto, a través de este criterio se clasificó a los ángulos de vista β menores a 45° como fachadas sombra y a los mayores a 45° como fachadas expuestas.

Figura 43. Histograma de $L_{AE\ fachadai}$ total para análisis de influencia de posición de fachada.

Para determinar las variaciones de ruido con respecto a la referencia, se realizaron mediciones de cada evento simultáneamente con dos micrófonos, uno en fachada y otro en una posición de referencia. El micrófono de referencia fue colocado de acuerdo con el criterio que establece la norma ISO 20906 en una posición donde no hubiera obstáculos ni superficies reflectantes en un radio de 10m y a una altura mínima de 7m sobre el suelo. El micrófono de fachada fue colocado a 2m de la fachada como se menciona en el Anexo B de la norma ISO 1996-2 con el fin de observar si los efectos de las reflexiones se veían reflejados en los niveles de ruido medidos y para estandarizar la metodología y hacer comparables las mediciones.

En todos los sitios de Madrid, el micrófono de referencia estaba lejos de la fachada a una distancia mínima de 10m de cualquier superficie reflectante u obstáculo. La biblioteca de Pisa fue el único sitio donde el micrófono se colocó en la azotea del edificio a una altura de 6m sobre el suelo. En las posiciones de referencia y fachada se obtuvieron los niveles $L_{AE\text{ referenciai}}$ y $L_{AE\text{ fachadai}}$ respectivamente, posteriormente se obtuvo ΔL_{AEi} como se muestra en la Ecuación 12. Se realizó este análisis en función de la posición de fachada, es decir, se contrastaron mediante t-student las medias de fachadas expuestas y sombra para observar si la posición de fachada era una variable estadísticamente significativa.

Dentro de los eventos medidos, 254 se observaron en fachadas expuestas y 373 en fachadas sombra. La media de ΔL_{AEi} para las fachadas sombra fue de 1,0 dBA y para las fachadas expuestas fue de -0,4 dBA. Ambos valores venían de distribuciones normales y mediante un contraste de medias t-student se comprobó que existen diferencias significativas entre las dos categorías de datos al obtener un p-valor de 0,00 para un estadístico t de -6,998. Estos valores medios fueron obtenidos con un nivel de confianza del 95%. Esto significa que los incrementos en los niveles de ruido en fachadas expuestas y sombra se encuentran dentro de los intervalos descritos por las Ecuaciones 13 y 14.

$$\text{Fachadas expuestas} = -0,4 \pm 2(0,1) \text{ dBA [13]}$$

$$\text{Fachadas sombra} = 1,0 \pm 2(0,1) \text{ dBA [14]}$$

Lugten *et al* en el aeropuerto de Schiphol en Amsterdam, midieron el ruido de eventos de aviación en fachadas expuestas y sombra en un edificio cercano a las pistas de aviación [43]. En dicho experimento se obtuvo una diferencia de niveles de 16 dBA, que es superior a la obtenida en este análisis. Sin embargo, esto se debe a que la altitud de los vuelos medidos en dicho análisis era de entre 50m y 100m mientras que en este análisis las altitudes eran de entre 500m y 1000m. Lo cual cambiaba la incidencia de las ondas sonoras haciendo que apenas se produjeran reflexiones con las fachadas.

3.2 CUANTIFICACIÓN DE EFECTOS DE FACTORES DE INFLUENCIA SOBRE LA PROPAGACIÓN DEL RUIDO DE AVIACIÓN

3.2.1 Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos

Con la intención de cuantificar los efectos de cada variable sobre los niveles de ruido en fachada un análisis de Regresión Lineal es llevado a cabo. Dicho análisis se realiza entre el nivel de ruido en fachada $L_{AE\text{ fachadai}}$ como la variable dependiente, el nivel de ruido en la posición de referencia

$L_{AE\ referencia i}$, siendo estas dos variables datos pareados, el ángulo β , el ángulo γ y la topología de calle como variables independientes. Dicho análisis tiene por objeto proporcionar un modelo con forma similar al mostrado en la Ecuación 10.

$$L_{AE\ fachada i} = L_{AE\ referencia i} + \varepsilon_{\beta} + \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{calle} [10]$$

Donde $L_{AE\ referencia}$ representa el nivel de ruido en referencia del i-ésimo evento, mientras que ε_{β} , ε_{γ} y ε_{calle} representan los efectos del ángulo β , el ángulo γ y de la topología de calle respectivamente.

Las variables que se analizan se muestran a continuación:

- $L_{AE\ referencia i}$: Es una variable cuantitativa y representa el nivel de exposición sonora de cada evento de ruido de aviación medido en la posición de referencia. En esta variable está presente la influencia de la emisión y propagación en campo libre, que son factores comunes entre las posiciones de referencia y fachada. Dicho nivel de ruido se calcula según el criterio de la norma ISO 20906 que especifica que debe haber una diferencia de 10 dBA entre el pico de la forma de onda y el ruido de fondo.
- Ángulo de vista (β): Es una variable cuantitativa y representa el ángulo formado entre la posición de la trayectoria de vuelo y la fachada donde se encuentra el punto de medición. La posición de la trayectoria de vuelo está definida mediante la distancia de *slant* y la altitud. Al no disponer de datos más precisos la resolución utilizada fue de entre 15° y 20°.
- Topología de calle: Es una variable cualitativa e indica el tipo de calle en el que se encuentra el punto de medición. La variable toma el valor de 1 si es tipo U y 0 si es tipo L.
- Ángulo de *slant* (γ): Es una variable cuantitativa y representa el ángulo formado entre la distancia perpendicular más corta, o distancia de *slant*, y la altitud desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo.

En los apartados anteriores se evaluó el impacto de la morfología urbana sobre la diferencia de niveles de ruido. Mediante dichos análisis fue comprobado que la morfología urbana influye sobre la diferencia de niveles. Sin embargo, mediante otro enfoque se ha llevado a cabo un análisis para observar en qué grado las variables de la morfología urbana cambian los niveles de ruido medidos en fachada. El enfoque propuesto para este análisis consiste en un modelo donde la variable dependiente es el nivel de ruido en fachada y una de las variables independientes es el nivel de ruido en la posición de referencia, siendo datos pareados.

Con la segunda campaña de mediciones y los eventos medidos para el análisis del apartado 3.2, se obtuvieron 1406 eventos, mientras que 95 eventos medidos en Pisa fueron utilizados para validar el modelo. En la Tabla 9 se observan los estadísticos descriptivos de los niveles de ruido medidos en las posiciones de referencia y fachada. Como se observa en la Tabla 9, de manera generalizada se observa un incremento en los niveles de ruido medidos en fachada con respecto a los niveles de ruido medidos en la referencia. Para ambas variables se observa que la desviación estándar de los niveles de ruido de los eventos medidos en cada posición es de 3 decibelios, lo cual muestra una dispersión sobre un amplio rango de valores. Esto se debe a que a pesar de que las mediciones han sido realizadas con condiciones similares de referencia y fachada, hay diversidad de escenarios y cada vuelo es único por sus características propias.

Variable	Número de eventos	Media [dBA]	Desviación estándar [dBA]	Mínimo [dBA]	Máximo [dBA]
$L_{AE\ referenciai}$	1406	81,5	2,9	73,3	90,7
$L_{AE\ fachadai}$		81,8	2,8	73,4	89,6

Tabla 9. Estadísticos descriptivos de eventos medidos en fachada y referencia

Esta segunda toma de datos permitió ampliar la diversidad de ángulos β y γ de cada trayectoria en los puntos de medición. La información sobre la posición de las trayectorias fue recuperada con la aplicación informática Webtrak del Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid Barajas. Mientras que la de los vuelos del Aeropuerto de Pisa Galileo Galilei fue recuperada con los datos ADS-B emitidos por el transpondedor de las aeronaves con ayuda de investigadores del Consejo Nacional de Investigación de Italia y la Agencia Regional de Protección Ambiental de la Toscana. Los nuevos datos, proporcionaron más ángulos de vista. En la nueva campaña de mediciones, las trayectorias de vuelo pasaban a distintas distancias de los sitios donde se encontraban unos puntos de medición con respecto a otros. Esto permitió considerar otra variable de la geometría fuente-receptor que es el ángulo de *slant* γ . Los ángulos de vista β se encontraban dentro de un rango de $[0^\circ-180^\circ]$ y los ángulos de *slant* γ en un rango de $[32^\circ-89^\circ]$.

Las mediciones de ruido fueron llevadas a cabo con dos micrófonos que medían simultáneamente los niveles de ruido en referencia y fachada. El micrófono de referencia fue colocado según el criterio establecido en la norma ISO 20906, a una altura mínima de 6m sobre el suelo y a una distancia de 10m a la redonda de cualquier superficie reflectante u obstáculo. Al momento de realizar las mediciones se tomaron notas sobre eventos provocados por otras fuentes de ruido para

quitarlas al momento de procesar los datos. Según el tipo de inmueble del que se tratara, había actividades que se llevaban a cabo en cada uno que podían ocasionar incrementos en los niveles de ruido de fondo y que podían llegar a enmascarar los eventos de ruido de aviación. Cuando ese era el caso, dichos eventos de ruido no eran considerados para el análisis y solamente se consideraban los que superaban al ruido de fondo en 10 dBA hasta el pico de la forma de onda. El Anexo B de la norma ISO 1996-2 indica que a 2m de una superficie reflectante con línea de vista hacia la trayectoria de vuelo es cuando se notan los efectos de fenómenos de onda a través de incrementos en los niveles de ruido. Por eso, los micrófonos de fachada eran colocados a 2m de fachada con el objeto de estandarizar las mediciones y hacerlas comparables.

Cada evento fue descrito con una topología de calle determinada en función del sitio donde se encontrara el micrófono de fachada. Con el ángulo γ , el ángulo β , la topología de calle y el nivel de ruido en la posición de referencia $L_{AEreferenciai}$ como variables independientes, y el nivel de ruido en fachada $L_{AEfachada}$ como variable dependiente, se llevó a cabo un análisis de Regresión Lineal Múltiple. $L_{AEreferenciai}$, el ángulo β y el ángulo γ eran variables cuantitativas, mientras que la topología de calle era una variable cualitativa del tipo *dummy* (U=0, L=1).

Mediante las correlaciones de Pearson se determinó si las relaciones entre todas las variables del análisis eran significativas. Las correlaciones de Pearson junto con sus pruebas de significación se muestran en la Tabla 10. Todas las correlaciones dieron positivas, lo cual significa que a medida que los ángulos β y γ aumentan, el valor de $L_{AEfachada}$ también lo hace. Además, se observa una relación lineal creciente como se muestra en la Figura 44.

Correlación de Pearson	$L_{AEfachada}$	$L_{AEreferenciai}$	β	γ
$L_{AEfachada}$	1,0	0,896	0,244	0,064
$L_{AEreferenciai}$	0,896	1,0	-0,034	0,329
β	0,244	-0,034	1,0	-0,381
γ	0,064	0,329	-0,381	1,0
Significación	-	0,0	0,0	0,008
	0,0	-	0,101	0,0
	0,0	0,101	-	0,0
	0,008	0,0	0,0	-

Tabla 10. Tabla de correlaciones de Pearson para modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos

Figura 44. $L_{AE} \text{ fachadai}$ vs $L_{AE} \text{ referencial}$

Mediante una prueba de normalidad Kolmogorov Smirnov se comprobó si los residuos provenían de una distribución normal. Con un estadístico de 0,040 y un p-valor de 0,00 se comprueba que los residuos de esta regresión no pertenecen a una distribución normal. Esto significa que las diferencias entre los valores predichos y los valores reales son significativas. Sin embargo, el teorema central del límite establece que conforme aumente el tamaño de una muestra, los datos se seguirán un comportamiento similar a una distribución normal. El histograma de los residuos puede observarse en la Figura 45. Posteriormente se llevó a cabo una prueba de homoscedasticidad donde se comprobó que se sigue una dispersión uniforme de los residuos como se observa en la Figura 46. Esto significa que la desviación estándar de los valores pronosticados es semejante a la de los valores medidos. Lo cual indica que el modelo propuesto proporcionaría una concordancia razonable con los resultados. Una vez analizados los supuestos de la regresión lineal múltiple, se comprobó que los coeficientes fuesen significativos. En la Tabla 11, se observan los estadísticos t y los p-valores obtenidos para cada uno de los coeficientes calculados en este análisis.

Figura 45. Histograma de residuos para modelo de propagación de ruido en entornos urbanos.

Figura 46. Residuos estandarizados vs residuos predichos de modelo de propagación de ruido en entornos urbanos.

Coefficiente	Valor	T	p-valor
Constante	5,74	8,695	0,00
$L_{AEreferenciai}$	0,936	111,086	0,00
γ	-0,027	-18,575	0,00
Topología	1,013	9,719	0,00
β	0,012	25,834	0,00

Tabla 11. Coeficientes de modelo y contrastes

El modelo está descrito mediante la Ecuación 15, y proporciona un coeficiente de determinación ajustado $\bar{R}^2$ de 0,90.

$$L_{AEfachada} = 0,936L_{AEreferenciai} + 0,012\beta - 0,027\gamma + 1,013topología + 5,74$$

[15]

En la ecuación 15, la variable *dummy* topología toma el valor de 1 cuando se trata de una topología U y a medida que aumentan el ángulo β , y $L_{AEreferenciai}$, aumentará también el nivel de ruido en fachada $L_{AEfachada}$. Sin embargo, al aumentar el ángulo γ , el nivel de ruido en fachada disminuye debido a que la incidencia de las ondas sonoras cambia y las reflexiones apenas se producen.

Con 95 eventos medidos en Pisa, se llevó a cabo la validación del modelo. Con una desviación estándar de 3,03 dBA, el Error RMS fue calculado obteniendo 1,01 dBA. Posteriormente se calculó el coeficiente de determinación ajustado a partir del error RMS y se obtuvo uno de 0,9. Como se observa en la Figura 46, los valores predichos se encuentran dentro de un intervalo de aproximadamente 1 dBA con respecto a los valores observados. En la Figura 47 se pueden observar los valores predichos y los valores observados junto con un error asociado a la medición del ruido de aviación, que de acuerdo con Rosin es de 1,3 dBA [65]. Esto muestra que el modelo obtenido proporciona una concordancia razonable a partir de los valores predichos.

Figura 47. Valores predichos y observados de $L_{AE} \text{ fachada}$.

Estos resultados son similares a los obtenidos mediante una simulación con el modelo sonAIR desarrollado por EMPA. Schlatter & Wunderli (2018) realizaron una simulación de dos vuelos cerca del aeropuerto de Zurich donde observaron la influencia del apantallamiento y las reflexiones de los edificios sobre los niveles de presión sonora. Este modelo considera a las superficies reflectantes como una serie de parches donde inciden las ondas sonoras y que mediante integraciones de las áreas de los parches y un orden de reflexiones especificado se calcula el nivel de inmisión. Se llevaron a cabo simulaciones con y sin edificios y se observó que los edificios influyen tanto en el apantallamiento como en la amplificación de los niveles de ruido cuando la altitud de los vuelos es de entre 570-800m. Mientras que cuando la altitud es superior a 2000m, los efectos de apantallamiento y amplificación son reducidos teniendo un impacto mínimo sobre los niveles de ruido en fachada [66, 67].

La diferencia entre dicho modelo y el desarrollado en esta tesis es que el modelo de dicho paquete de software es analítico al suponer a las superficies con un determinado orden de reflexiones y realizar integraciones sobre ellas. Mientras que el de esta tesis se basa en un amplio muestreo de sitios con exposición al ruido de aviación mediante el cual se cuantificaron los efectos individuales del ángulo β , el ángulo γ y la topología de calle. Este modelo, además es empírico, ya que es de aplicación más fácil para una campaña de medición. De acuerdo con los resultados de este modelo, cuando se tienen ángulos γ entre 30° y 50° y una topología L se observa que los valores de ruido en fachada aumentan entre 2,5 y 3 dBA. Mientras que cuando se trata de una topología U, los

niveles de ruido en fachada aumentan hasta 4 dBA. Pero al tratarse de un ángulo γ cercano a 90°, el incremento de ruido en fachada es inferior a 1 dBA. El 90% de la varianza es explicado mediante este modelo. Esto significa que las variables utilizadas para llevar a cabo este análisis contienen información suficiente para llevar a cabo un diagnóstico adecuado de los niveles de ruido.

3.2.2 Efectos del ángulo de *slant* γ sobre el factor de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2

El Anexo B de la norma ISO 1996-2 indica un factor de corrección que debe aplicarse al nivel de ruido medido en fachada para extrapolar los niveles de ruido en condiciones de referencia. Este ruido es producido por fuentes sonoras del tipo extendidas, es decir tráfico, aviones y ferrocarriles. Sin embargo, este factor no ha sido estudiado para el ruido de aviación, cuya propagación varía con respecto al ruido producido por tráfico o ferrocarriles por tener una altitud. La altitud de los vuelos cambia la propagación del ruido y con ello la incidencia sobre la fachada.

Por medio de un modelo de regresión lineal se propone un método para calcular el factor de corrección cuando la altitud cambia. Para esto, se utilizan las variables $L_{AEfachada i}$ y $L_{AEreferencia i}$ que son datos pareados. El objeto de este modelo es demostrar que hay una relación entre $L_{AEreferencia i}$ y variables como $L_{AEfachada i}$, el ángulo γ y el tipo de vuelo (despegues/aterrizajes). Una vez que se demuestre dicha relación, se pretende obtener un modelo de una forma similar al que se muestra en la Ecuación 16.

$$L_{AEreferencia i} = L_{AEfachada i} + \varepsilon_{\gamma} + \varepsilon_{vuelo} [16]$$

Las variables que se analizan con este modelo son las siguientes:

- $L_{AEreferencia i}$: Es una variable cuantitativa y representa el nivel de ruido de cada evento de ruido de aviación medido en la posición de referencia.
- $L_{AEfachada i}$: Es una variable cuantitativa y representa el nivel de ruido de cada evento de ruido de aviación medido en la posición de fachada.
- γ : Es una variable cuantitativa y representa el ángulo de *slant* que se forma por la distancia de *slant* y la altitud de cada vuelo.
- *Vuelo*: Es una variable *dummy* y representa el tipo de vuelo del que se trata. La variable vuelo toma el valor de 1 cuando se trata de un aterrizaje y 0 cuando es un despegue.

El Anexo B de la norma ISO 1996-2 menciona que las mediciones de ruido provocado por una fuente extendida deben ser realizadas en una posición de referencia a 6 m de altura sobre el suelo y

en un radio de 10m sin obstáculos ni superficies reflectantes salvo el suelo. Sin embargo, no siempre es posible encontrar posiciones sin obstáculos ni superficies reflectantes. Para esos casos, el Anexo B muestra unos factores de corrección para extrapolar los niveles de ruido en la posición de referencia a partir de los niveles medidos cerca de una superficie reflectante vertical provocados por una fuente extendida y muestra una serie de condiciones en las que la corrección propuesta sería válida. El micrófono debe ser colocado de manera que minimice efectos de difracción a una distancia de la fachada entre 0,5 y 2m con un ángulo β de entre 60° y 180°. El Anexo B de la norma ISO 1996-2 establece que si se cumplen estas condiciones, al restar 3 dBA del nivel medido en fachada será posible extrapolar el nivel de ruido que se obtendría en la posición de referencia.

Este factor de corrección ha sido ampliamente estudiado para el ruido de tráfico, pero no para el ruido de aviones. En el caso del ruido de aviación, la geometría fuente-receptor cambia debido a que la fuente se ubica a determinada altitud con respecto al receptor. Esta altitud junto con la distancia de *slant*, dan origen al ángulo γ , mismo que modifica la incidencia sonora de las ondas acústicas producidas por los aviones. Por esto, se quiere comprobar la influencia del ángulo γ .

El factor de corrección fue evaluado a partir de mediciones a trayectorias de vuelo con ángulos de *slant* entre 32° y 89° γ y ángulos de vista β de entre 60° y 180°. Las mediciones fueron realizadas simultáneamente con dos micrófonos, uno en fachada y otro en referencia. El micrófono de referencia fue colocado a una altura de 6m sobre el suelo sin obstáculos ni superficies reflectantes en un radio de 10m como lo indica la norma ISO 20906. Mientras que el micrófono de fachada fue colocado a 2m de fachada para observar si se cumple la amplificación de 3 dBA como lo especifica el Anexo B de la norma ISO 1996-2.

Los eventos de ruido de aviación fueron procesados según el criterio que establece la norma ISO 20906. Dicho criterio indica que se debe calcular el nivel de exposición sonora de cada evento al realizar la sumatoria de los niveles $L_{Aeq,1s}$ notando una diferencia de 10 dBA sobre el ruido de fondo desde el pico de la forma de onda generada por el evento de ruido de aviación. Al momento de realizar la captura de los eventos de ruido de aviación se tomaron notas para discriminar el ruido producido por eventos de aviación de otras fuentes sonoras. También se prestaba atención a actividades cotidianas de los inmuebles donde se realizaban mediciones ya que algunas de ellas podían generar ruido que llegase a enmascarar los niveles de ruido producidos por cada evento de aviación. Por otro lado, algunas de las posiciones seleccionadas se encontraban cerca de autopistas y sitios donde había más fuentes de ruido que podían llegar a contaminar las mediciones. Los

efectos de estas fuentes, con ayuda de datos no acústicos, fueron removidos al momento de procesar los datos.

En la Tabla 12 se observan los estadísticos descriptivos de los eventos de ruido de aviación medidos en las posiciones de referencia y fachada. Como se puede observar, en ambos casos hay una desviación estándar de 2,8 decibelios, lo cual representa una dispersión amplia sobre una gran variedad de datos. Sin embargo, la media de los niveles de ruido en fachada no varía mucho con respecto a la de los niveles de ruido en referencia debido a que los escenarios para el análisis requerido son más uniformes al tener en todas las posiciones ángulos de vista β entre 60° y 180° . Por eso, con un análisis de regresión lineal múltiple se pretende observar qué influencia tienen variables como los ángulos de *slant* γ y el tipo de vuelo.

Variable	Número de eventos	Media [dBA]	Desviación Estándar [dBA]	Mínimo [dBA]	Máximo [dBA]
$L_{AEreferenciai}$	942	81,0	2,8	73,3	90,7
$L_{AEfachadai}$		81,7	2,8	73,4	89,6

Tabla 12. Estadísticos descriptivos de eventos medidos en fachada y referencia

Se midió un total de 942 eventos de ruido de aviación y fueron clasificados en función del ángulo γ . Los ángulos γ obtenidos estaban dentro de un rango de $[32^\circ-89^\circ]$ y cada evento fue descrito en función del tipo de vuelo (aterrizaje/despegue). El ángulo γ , los niveles de ruido medidos en las posiciones de referencia ($L_{AEreferenciai}$) y fachada ($L_{AEfachadai}$) y el tipo de vuelo fueron utilizados para determinar un modelo de Regresión Lineal Múltiple. $L_{AEreferenciai}$ es la variable dependiente. Las variables independientes son $L_{AEfachada}$ y γ , mismas que son variables cuantitativas y el tipo de vuelo es una variable cualitativa *dummy*. Con dicho modelo se pretende determinar qué relación tienen el ángulo γ , el nivel de ruido en la posición de fachada $L_{AEfachada}$ y el tipo de vuelo con los niveles de ruido medidos en la posición de referencia $L_{AEreferenciai}$.

Se calcularon las correlaciones de Pearson entre $L_{AEreferenciai}$ y $L_{AEfachadai}$ y se muestran en la Tabla 13. Además, los niveles de ruido $L_{AEreferenciai}$ fueron graficados en un plano coordinado frente a los valores $L_{AEfachadai}$ y como se observa en la Figura 48, hay una relación lineal creciente entre ellos. A partir de los resultados obtenidos de las correlaciones y lo que muestra la Figura 48, se puede concluir que se cumple el supuesto de la linealidad.

Correlación de Pearson	$L_{AEreferencial}$	$L_{AEfachadai}$	γ
$L_{AEreferencial}$	1,0	0,932	0,287
$L_{AEfachadai}$	0,932	1,0	0,04
γ	0,287	0,04	1,0
Significación	-	0,0	0,0
	0,0	-	0,108
	0,0	0,108	-

Tabla 13. Correlaciones de Pearson para modelo de influencia de ángulo de *slant* sobre $L_{AEfachadai}$

Figura 48. $L_{AEreferencial}$ vs $L_{AEfachadai}$

Cada uno de los eventos medidos para el análisis realizado tiene sus características propias. Es decir, cada uno cuenta con su distancia horizontal al punto de medición y altitud, cada avión produce un ruido específico y ocurrió a una hora determinada. El coeficiente de Durbin Watson fue calculado con un valor igual a 1,59. Por lo tanto, observando el valor del coeficiente de Durbin Watson se puede considerar que se cumple el supuesto de la independencia de todos los eventos medidos. Los residuos del modelo fueron calculados y posteriormente se les aplicó una prueba de normalidad Kolmogorov Smirnov para determinar si dichos residuos vienen de una distribución

normal. Con la prueba de normalidad realizada, se obtuvo un p-valor de 0,2, mismo que para un nivel de confianza del 95% indica que los residuos pertenecen a una distribución normal. Además, se puede observar en la Figura 49 el histograma de los residuos calculados, dicho histograma tiene una forma similar a la de una distribución normal. Por lo tanto, se cumple el supuesto de la normalidad, lo cual significa que no hay diferencias significativas entre los valores predichos y los valores reales.

Figura 49. Histograma de residuos calculados para modelo de influencia de ángulo de *slant* sobre L_{AE} fachada*i*

Una vez que se observó el cumplimiento de los supuestos de la regresión lineal, se verificó que los coeficientes del modelo fueran estadísticamente significativos para el análisis. En la Tabla 14, se muestran los valores de los coeficientes del modelo y se observa que el p-valor obtenido para cada uno de ellos es significativo. Por lo tanto, se puede concluir que los coeficientes son valores reales de la regresión lineal.

Coficiente	Valor	T	p-valor
Constante	1,664	2,342	0,019
$L_{AEfachadai}$	0,947	104,25	0,00
γ	0,027	8,7	0,00
Vuelo	0,574	5,296	0,00

Tabla 14. Coeficientes de modelo con sus niveles de significación

El modelo descrito por este análisis de Regresión Lineal Múltiple proporciona un coeficiente de determinación ajustado $\bar{R}^2$ de 0,93. Lo cual indica que el 93% de la varianza de los datos medidos es explicado por este modelo y se describe mediante la Ecuación 17.

$$L_{AEreferenciai} = 0,947L_{AEfachadai} + 0,027\gamma + 0,574vuelo + 1,664 \quad [17]$$

La variable vuelo como se observa en la Tabla 14 representa una variable significativa dentro de la propagación del ruido de aviación. Las variables operativas influyen en los niveles de presión sonora producidos en función del tipo de evento de aviación del que se trate. Tarabini, M *et al* (2014) desarrollaron un modelo basado en reconocimiento de patrones donde a través de mediciones con sonómetros y sondas de intensidad se logró distinguir si el evento medido se trataba de un despegue o un aterrizaje. Una vez que fue desarrollado el modelo, se validó con mediciones en el aeropuerto de Milán Malpensa logrando identificar el 99% de los eventos [68]. Esto comprueba que el ruido emitido por las aeronaves durante los despegues y aterrizajes es distinto ya que dichas maniobras constituyen variables operativas que requieren de diversos procedimientos que pueden producir distintos niveles de ruido.

La variable *dummy* vuelo toma el valor de 1 cuando se trata de un aterrizaje. A medida que aumenta el ángulo γ , el nivel de ruido en la posición de referencia también lo hace, reduciendo de esta manera el valor del factor de corrección que propone el Anexo B de la norma ISO 1996-2. Cuando el ángulo de *slant* γ es cercano a 90°, la incidencia acústica apenas llega a darse en la fachada del edificio y el factor de corrección llega a ser inferior a 1 dBA. Mientras que cuando el ángulo γ está entre 20° y 50°, la diferencia entre los niveles de referencia y fachada está dentro de un rango de 2,5-4 dBA. El coeficiente de determinación de 0.93 indica que las variables utilizadas en este análisis contienen información suficiente para realizar un diagnóstico adecuado de los niveles de ruido en fachada.

4. CONCLUSIONES Y APORTACIONES

Los objetivos planteados en esta tesis fueron los siguientes:

- Identificar factores significativos sobre la propagación del ruido de aviación
- Cuantificar la influencia de los factores de la morfología urbana
- Definir una metodología para el análisis
- Proponer un modelo que relacione las diferentes variables consideradas con las variables de estudio para determinar el nivel de ruido en fachada.
- Proponer un modelo de corrección para mediciones y simulaciones para obtener resultados comparables a los de la posición de referencia que indica el Anexo B de la norma ISO 1996-2.

En la primera parte de esta sección, se detallan las conclusiones a las que se llegaron a partir de los análisis efectuados a los resultados obtenidos mediante el experimento propuesto. La segunda parte se refiere a la difusión de estos resultados mediante publicaciones en revistas científicas. La última parte muestra las futuras líneas de investigación derivadas de la tesis.

4.1 CONCLUSIONES

Análisis de ruido a lo largo de la fachada

Se ha observado que no en todas las fachadas hay el mismo ruido. En algunas fachadas hay mayores niveles de ruido que en otras y eso se debe a la orientación que tienen hacia las trayectorias de vuelo. Con la variable ángulo de vista, se ha evaluado la cantidad del evento sonoro que se encuentra en transmisión directa con el punto de medición. A medida que aumenta el ángulo de vista, también lo hace la cantidad del evento sonoro en transmisión directa y eso da origen a mayores niveles de ruido registrados en fachada. Esta es una de las razones por las que algunas fachadas registran mayores niveles de ruido con respecto al nivel de ruido promedio de cada edificio.

También se ha considerado la posible influencia de la topología de calle sobre los niveles de ruido en fachada. Además de distintos ángulos de vista, se llevaron a cabo mediciones en distintas topologías de calle y se observó que las topologías de calle influyen sobre las onda sonoras. En una topología U al haber más paredes que en una topología L, se generan más fenómenos de onda que dan origen a niveles de ruido más altos. Por lo tanto, la topología de calle también es una variable que puede hacer que una fachada registre niveles de ruido más altos que el resto de las fachadas.

Por ejemplo, una topología U al tener más paredes que una topología L provocará más fenómenos de onda.

El ángulo de vista y la topología de calle en conjunto dan origen a una mayor cantidad de fenómenos de onda que resultarán en mayores niveles de ruido. Una topología de calle L con un ángulo de vista grande, generará niveles de ruido más altos que los producidos en una calle con un ángulo de vista pequeño. Mientras que una calle U con un ángulo de vista grande afectará a las ondas acústicas provocando niveles de ruido más altos que en una calle L con un ángulo de vista similar. Estas dos variables en conjunto, hacen que algunas fachadas de un edificio sean más ruidosas que otras.

Influencia de fachadas expuesta y sombra sobre el nivel de ruido en condiciones de referencia

Con las mediciones realizadas en los sitios donde había una posición de referencia adecuada se llevó a cabo un análisis de los efectos de la fachada sobre el cambio en la propagación del ruido de aviación. Las fachadas fueron clasificadas en expuestas y sombra. Se calcularon y contrastaron sus medias aritméticas, con lo que se observaron diferencias significativas entre las medias de las fachadas expuestas y sombra. Es decir, en una fachada expuesta hay más ruido que en una fachada sombra por contar con transmisión directa de ondas sonoras. Demostrando así, que la posición de la fachada con respecto a la trayectoria de vuelo es una variable estadísticamente significativa dentro de la propagación del ruido de aviación en entornos urbanos.

Cuando una fachada está expuesta al ruido de aviación, dicha fachada proporciona reflexiones que se suman a las ondas sonoras incidentes en el punto de medición. Mientras que cuando una fachada se encuentra en la zona sombra de un edificio, la fachada aporta menos reflexiones a los niveles de ruido. Los factores de corrección que han sido calculados, muestran que con un nivel de confianza del 95% las fachadas pueden aportar correcciones en un rango de $1 \pm 2(0,1)$ dBA cuando están expuestas. Mientras que cuando se encuentran en la zona sombra, se tiene una atenuación de los niveles de ruido en condiciones de referencia que se encuentra dentro de un rango de $-0,4 \pm 2(0,1)$ dBA.

Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos

La morfología urbana modifica la propagación del ruido de aviación. En los entornos urbanos existen elementos que al interactuar con las ondas sonoras producidas por un avión dan lugar a distintos niveles de presión sonora. Las topologías de calle modifican la propagación al generar diferentes cantidades de reflexiones. Estos elementos, además de la geometría fuente-receptor

modifican la incidencia de las ondas sonoras afectando los niveles de ruido que se producen. Mediante un modelo, se cuantificó el efecto de cada uno de estos factores para observar cómo son modificados los niveles en condiciones de referencia.

La topología de calle fue evaluada y se determinó su influencia sobre la propagación del ruido de aviación. La topología de calle es una variable de la morfología urbana que modifica los niveles de ruido en fachada por los distintos órdenes de reflexiones en los puntos de medición. Una topología U produce fenómenos de onda que una topología L por contar con dos paredes. Por lo tanto, en una calle U los niveles de ruido que se registren serán mayores a los de una calle L.

Se evaluó la influencia del ángulo β sobre la propagación del ruido de aviación. Este ángulo pertenece a la geometría fuente-receptor, y define el segmento de la trayectoria de vuelo que está en transmisión directa con el punto de medición. Conforme aumente el ángulo de vista, una mayor cantidad de la trayectoria de vuelo estará en transmisión directa con la fachada en cuestión y los niveles de ruido serán amplificados. Mientras que a medida que el ángulo de vista disminuya, una menor cantidad de ondas sonoras incidirán sobre el punto de medición y por ello el ruido se verá atenuado.

El ángulo de *slant* está formado por la distancia de *slant* y la altitud del vuelo. Este ángulo modifica la manera en que inciden las ondas acústicas en la fachada. Conforme aumente el ángulo γ , la incidencia de las ondas sonoras apenas se dará en la fachada. Por lo tanto, a medida que aumente el ángulo γ , el nivel de ruido medido en fachada será menor. Mientras que si el ángulo de *slant* disminuye, la incidencia de las ondas acústicas será más notable provocando una amplificación de los niveles de ruido.

El conjunto de todos estos elementos afecta a la propagación del ruido de aviación pero cada uno influye de manera individual con una proporción determinada. Con este análisis realizado, se ha logrado cuantificar el efecto de cada factor sobre el nivel de ruido en fachada y se ha desarrollado una metodología que permite observar los cambios de la propagación en distintos escenarios. Una calle U con un gran ángulo de vista pero con un ángulo de *slant* alto amplificará los niveles de ruido en fachada, pero en menor proporción a como lo haría una calle U con ángulo de *slant* pequeño. Los niveles de ruido de aviación en una ciudad se verán modificados en función del tipo de calle con la que cuenten, el ángulo de vista que tengan y el ángulo de *slant*. Esto permite extrapolar el nivel de ruido en posiciones de referencia a partir del ruido en fachada.

A través del estudio del factor de corrección en fachada se ha llegado a la conclusión de que además de la influencia de la superficie reflectante hay variables propias de la geometría fuente-receptor y operativas que modifican los niveles de ruido en fachada y con ello el factor de corrección. La altitud de los vuelos es una variable de la geometría fuente-receptor para el ruido de aviación que influye en la propagación del ruido al cambiar la incidencia de las ondas sonoras. Mientras que el tipo de vuelo (despegue/aterrizaje) también es una variable que modifica la propagación del ruido de aviación.

Los aviones al tener una altitud y distancia horizontal cuentan con un ángulo de *slant* γ que provoca distintos fenómenos acústicos al modificar la incidencia de las ondas sonoras. Dichos fenómenos resultan en una modificación del valor del factor de corrección que menciona el Anexo B de la norma ISO 1996-2. Cuando el ángulo γ es pequeño, se produce una reflexión en fachada, mientras que cuando se acerca a 90° apenas tiene incidencia la onda sonora. Es decir, un ángulo γ de entre 20° - 50° resulta en un aumento del nivel de ruido en fachada en un rango de [2-4 dBA], pero cuando es cercano a 90° , el factor de corrección llega a ser inferior a 1 dBA ya que el avión vuela sobre la vertical del edificio.

Por otro lado, las variables operativas como el tipo de vuelo influyen directamente en los niveles de ruido producidos en fachada. Para un vuelo se llevan a cabo una serie de maniobras distintas para un despegue o aterrizaje, esto ocasiona que el fenómeno de reflexión sea distinto. Con este estudio realizado al factor de corrección de la norma ISO 1996-2 se ha demostrado que sobre dicho factor no solo influyen variables propias de la morfología urbana, sino también de la geometría fuente-receptor y operativas, mismas que pueden hacer que el factor de corrección del Anexo B de la norma ISO 1996-2 cambie significativamente.

4.2 APORTACIONES

A continuación, se enuncian las principales aportaciones de los estudios y trabajos realizados en esta tesis doctoral:

- Se ha propuesto una metodología de análisis que permite evaluar el impacto de variables de la morfología urbana en la propagación del ruido de aviación. Por medio de esta metodología además del impacto de las variables demostradas en esta tesis, se podrá evaluar en el futuro el impacto de otras variables.

- Se ha determinado que algunas de las variables modifican significativamente el ruido de aviación. Por medio de mediciones y análisis estadísticos se ha determinado que la topología de calle y el ángulo β son variables que modifican significativamente los niveles de ruido de aviación.
- Se ha cuantificado el impacto de variables de la morfología urbana que modifican significativamente la propagación del ruido de aviación dentro de un entorno urbano. Esto se ha logrado a través de dos modelos que permiten calcular el nivel que se obtendría en las posiciones de referencia y fachada a partir de variables de la geometría fuente-receptor, operativas y de la morfología urbana.

4.2.1 ARTÍCULOS EN REVISTAS CIENTÍFICAS

Artículo	Estado
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G A case study of the influence of urban morphology on aircraft noise	Publicado Q4
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G Study of the correction factors for aircraft noise façade measurements	Publicado Q2
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G Enhancing a model of urban morphology's impact on aircraft noise	En revision Q1

- Estancia de investigación en CNR de Italia. Contacto con otros grupos de investigación y trabajo en otros proyectos de investigación.

4.3 LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

A lo largo del desarrollo del experimento, hubo ciertas variables importantes dentro de la morfología urbana cuya potencial influencia sobre los niveles de presión sonora de los eventos de aviación se deseaba analizar, pero por limitaciones de los complejos bajo análisis no fue posible. Dichas variables se han convertido en retos a desarrollar en el futuro y se mencionan a continuación:

- La altura de las fachadas: A pesar de que fueron analizadas las alturas a las que se llevaron a cabo las mediciones, el rango de alturas fue muy limitado debido a que la mayoría de los edificios contaban tan solo con dos alturas de fachada. Esto marca la pauta para analizar esta variable por medio de mediciones a una mayor variedad de alturas ya que podrían tener una influencia sobre la propagación del ruido.
- El material del suelo y la pared: Las mediciones se llevaron a cabo en lugares donde las paredes eran de materiales similares al igual que el suelo. Los diferentes materiales con los que se pueden hacer las paredes de un edificio cuentan con propiedades acústicas determinadas que constituyen elementos importantes dentro de la propagación del ruido porque aíslan determinadas frecuencias y provocan distintos fenómenos acústicos.

5. CONCLUSIONS AND CONTRIBUTIONS

The goals of this doctoral dissertation were the following:

- Identifying significant factors of urban morphology
- Quantifying the influence of urban morphology factors.
- Defining a methodology for the analysis.
- Proposing a model that relates the different variables considered with the ones under study for calculating the façade noise levels.
- Proposing a correction model for measurements and simulations for obtaining comparable results to those of the reference position stated by ISO 1996-2's Annex B.

In the first part of this section, the conclusions obtained from the results of the experiment proposed are explained in detail. Afterwards, the diffusion of the results in scientific journals is mentioned. Finally, the last section shows the future lines of investigation derived from the research of this dissertation.

5.1 CONCLUSIONS

Study of the influence of urban morphology on aircraft noise levels along a façade

It has been noted that not all façades are exposed to the same amount of noise. Some façades have greater sound pressure levels than others due to their orientation towards the flight paths. With the variable LOS angle β , it has been evaluated the amount of the aircraft noise event that will be in direct transmission with the assessment point. If the LOS angle increases, the amount of the flight path in direct transmission will as well causing greater noise levels registered on façade. This is one of the reasons some façades register greater noise levels with respect to the average noise level of each building.

The influence of the street topology on façade noise levels has been considered as well. Apart from the different LOS angles, measurements were performed on different Street topologies and it was noted that they have an influence on sound waves. On a U topology, as there are more walls than on an L topology, more wave phenomena are generated. Therefore, the street topology is also a variable that can result in a façade generating greater noise levels than the rest of the façades.

The LOS angle and the street topology altogether originate a greater amount of wave phenomena that will result in greater noise levels. An L street topology with a large LOS angle will result in greater noise levels in comparison to the ones generated on a Street with a smaller LOS angle.

Whereas on a U Street with a large LOS angle the acoustic waves will be affected resulting in greater noise levels than the ones generated on an L Street with a similar LOS angle. These two variables altogether, result in a building having façades with greater noise levels than others.

Correction factors to be applied on facade for sound pressure levels in reference conditions

With the measurements performed in the sites in which there was an appropriate reference position, an analysis of the effects of façade on aircraft noise propagation was performed. The façades were classified in exposed façades and shadow façades. The mean values were calculated and a t-student test was performed between their mean values. That test showed significant differences between the mean values of exposed and shadow façades. This proved that the façade position with respect to the flight path is a statistically significant variable in aircraft noise propagation on urban environments.

When a façade is exposed to aircraft noise, it gives reflections that are added to the incident sound waves in an assessment point. Whereas when a façade is located at the shadow zone of a building, it supplies fewer reflections towards aircraft noise. The calculated correction factors show that with a confidence level of 95% the façades contribute with corrections within a range of $1 \pm 2(0,1)$ dBA when they are exposed. Whereas when they are located in the shadow zone, there is an attenuation of the noise levels measured in reference conditions that are located within a range of $-0,4 \pm 2(0,1)$ dBA.

Aircraft noise propagation model in urban environments

Urban morphology modifies aircraft noise propagation. In urban areas, there are elements that interact with sound waves produced by aircraft, they originate different sound pressure levels. Street topologies modify noise propagation by generating different amounts of reflections. These elements, apart from source-receiver geometry modify sound waves incidence affecting the noise levels produced. Through a model the effect of each of these factors was quantified to observe how the noise levels in reference conditions were modified.

Street topology was evaluated and its influence on aircraft noise propagation was determined. Street topology is a variable of urban morphology that modifies façade noise levels with the different reflection orders on the assessment points. A U topology produces more wave phenomena than an L topology as it has two walls. Therefore, on a U street the noise levels registered will be greater than the ones generated on an L street.

The influence of the LOS angle on aircraft noise propagation was evaluated. This angle belongs to the source-receiver geometry and it defines the fraction of the flight path that will be in direct transmission with the assessment point. When increasing the LOS angle, a greater amount of the flight path will be in direct transmission with the façade and the noise levels will be amplified. Whereas, when decreasing a LOS angle, a smaller amount of the sound waves will reach the assessment point and therefore the noise levels will be attenuated.

The slant angle is formed by the shortest perpendicular distance from the assessment point to the flight and the altitude. The slant angle modifies the way in which acoustic waves reach façade. If the slant angle increases, the sound waves will generate fewer reflections resulting in smaller sound pressure levels generated on façade. Whereas, if the slant angle decreases, sound waves will reach the façade with greater ease resulting in an amplification of the façade noise levels.

These variables altogether affect aircraft noise propagation but each one has an individual contribution with a determined proportion. With this analysis performed, the effect of each variable on the façade noise level has been quantified and a methodology which allows observing the aircraft noise modification in different scenarios has been developed. A U street with a great LOS angle and a large slant angle will result in a smaller amplification of the façade noise levels in comparison to the ones obtained on a U street with a smaller slant angle. The aircraft noise levels on a city will be modified depending on the street topology, the LOS angle and the slant angle. This allows extrapolating levels in reference positions from the façade noise level measured.

Effects of the slant angle γ on standard ISO 1996-2's Annex B correction factor

Through the study performed to the correction factor on façade when there are noise measurements caused by extended sources a conclusion has been reached. It can be concluded that apart from the influence of the reflecting surface, there are operative and source-receiver geometry variables that modify façade noise levels and the correction factor. Flight paths altitude is a variable of source-receiver geometry for aircraft noise that influences its propagation by changing the incidence of sound waves. On the other hand, the flight type whether it is a landing or a takeoff, is a variable that modifies aircraft noise propagation.

Flight paths have altitudes and horizontal distances, therefore they have a slant angle that causes different acoustic phenomena by modifying sound wave incidence. Those phenomena result in a modification of the value of the correction factor mentioned on ISO 1996-2 Annex B. When the slant angle is small, a reflection is produced on façade, whereas when the slant angle is close to 90°

the reflection is barely produced. Consequently, a small slant angle results in an increase of the façade noise level within a range of [2-4 dBA], but when the slant angle is close to 90°, the correction factor becomes smaller than 1 dBA as the aircraft passes over the vertical line of the building.

Furthermore, the operative variables like flight type influence façade noise levels directly. For a flight there are a series of different maneuvers whether it is a landing or a takeoff, this results in different reflections produced for takeoffs and landings. With this study performed to the correction factor of the standard ISO 1996-2 it has been demonstrated that it is not only influenced by urban morphology variables, but also by noise-receiver geometry and operative variables. Those variables result in a significant modification of the correction factor of standard ISO 1996-2's Annex B.

5.2 CONTRIBUTIONS

The main contributions of the studies and research performed through this dissertation are enunciated below:

- A methodology which allows evaluating the impact of urban morphology variables on aircraft noise propagation has been proposed. By means of this methodology, apart from the impact of the variables shown in this dissertation, it will be able to determine the effects of other variables on aircraft noise propagation.
- It has been determined which variables modify aircraft noise significantly. Through measurements and statistical analyses, it has been determined that the street topology and the angle β are variables that modify aircraft noise propagation.
- The impact of urban morphology variables on aircraft noise propagation has been quantified. This has been accomplished with two models that allow calculating the level that will be obtained in façade and reference positions from source-receiver geometry elements, operative variables and urban morphology factors.

5.2.1 ARTICLES IN JOURNALS

Article	State
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G A case study of the influence of urban morphology on aircraft noise	Published Q4
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G Study of the correction factors for aircraft noise façade measurements	Published Q2
Flores, R; Asensio, C; Gagliardi, P; Licitra, G Enhancing a model of urban morphology's impact on aircraft noise	Under revision Q1

5.3 FUTURE RESEARCH TOPICS

Throughout the development of the experiment, there were certain important variables of urban morphology that have an influence on sound pressure levels that could not be widely studied because of the limitations provided by the complexes under analysis. Those variables have become challenges to be developed in the future and they are mentioned below:

- Façade height: In spite of the analyses performed to the heights in which measurements were executed, the height range under analysis was limited due to the fact that most buildings consisted solely of two storeys. This set the bases for the study of more variables that have an influence on aircraft noise propagation and that could be analyzed in the future with measurements performed to buildings with greater heights.
- Ground and Wall materials: The measurements were performed in places where the walls and grounds were of similar materials. The different materials with which the walls of a building are made have certain acoustic properties that constitute important elements within the aircraft noise propagation because they can insulate certain frequencies and produce diffusion phenomena.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Crocker, D. (2007). Dictionary of aviation: Over 5500 terms clearly defined. A & C Black.
- [2] Europea, U. (2011). Libro blanco del Transporte. *Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*. Luxembourg, Belgium.[Links].
- [3] Bråthen, S., & Halpern, N. (2012). Air transport service provision and management strategies to improve the economic benefits for remote regions. *Research in Transportation Business & Management*, 4, 3-12.
- [4] Airbus, G. M. F. (2017). Growing Horizons 2017–2036.
- [5] Zaporozhets, O., Tokarev, K., & Attenborough, K. (2011). *Aircraft noise: Assessment, prediction and control* (First Edition ed.). USA & Canada: Spon Press.
- [6] Upham, P., Thomas, C., Gillingwater, D., & Raper, D. (2003). Environmental capacity and airport operations: current issues and future prospects. *Journal of Air Transport Management*, 9(3), 145-151.
- [7] Mahashabde, A., Wolfe, P., Ashok, A., Dorian, C., He, Q., Fan, A., ... & Locke, M. (2011). Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. *Progress in Aerospace Sciences*, 47(1), 15-52.
- [8] ICAO. (2014). Assembly resolutions in force (as of 4 october 2013).*Doc 10022*
- [9] Hurlley, C. (2009). *Night noise guidelines for europe* WHO Regional Office Europe.
- [10] Janssen, S. A., Centen, M. R., Vos, H., & van Kamp, I. (2014). The effect of the number of aircraft noise events on sleep quality. *Applied Acoustics*, 84, 9-16.
- [11] Tobías, A., Recio, A., Díaz, J., & Linares, C. (2015). Health impact assessment of traffic noise in Madrid (Spain). *Environmental research*, 137, 136-140.
- [12] Pirrera, S., De Valck, E., & Cluydts, R. (2010). Nocturnal road traffic noise: A review on its assessment and consequences on sleep and health. *Environment international*, 36(5), 492-498.
- [13] Morrell, S., Taylor, R., & Lyle, D. (1997). A review of health effects of aircraft noise. *Australian and New Zealand journal of public health*, 21(2), 221-236.
- [14] Swift, H. (2010). *A Review of the Literature Related to Potential Health Effects of Aircraft Noise* (No. PARTNER Project 19). Partnership for Air Transportation Noise and Emissions Reduction Massachusetts Institute of Technology.
- [15] Münzel, T., Gori, T., Babisch, W., & Basner, M. (2014). Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European heart journal*, 35(13), 829-836.
- [16] Schroeder, M. (2007). Handbook of acoustics.

- [17] Müller, G., & Möser, M. (Eds.). (2012). *Handbook of engineering acoustics*. Springer Science & Business Media.
- [18] Recuero, M. (2000). Ingeniería acústica. *Madrid: Paraninfo*.
- [19] de la Edificación, C. T. (2009). Documento Básico HR Protección frente al ruido. *Ministerio de Vivienda, Espana, Update of April*.
- [20] ICAO. (2008). Doc. 9829 guidance on the balanced approach to aircraft noise management
- [21] Ganic, E. M., Netjasov, F., & Babic, O. (2015). Analysis of noise abatement measures on European airports. *Applied Acoustics*, 92, 115-123.
- [22] Scatolini, F., Alves, C. J. P., & Eller, R. D. A. G. (2016). Easing the concept “Balanced Approach” to airports with densely busy surroundings—The case of Congonhas Airport. *Applied Acoustics*, 105, 75-82.
- [23] Postorino, M. N., & Mantecchini, L. (2016). A systematic approach to assess the effectiveness of airport noise mitigation strategies. *Journal of Air Transport Management*, 50, 71-82.
- [24] Girvin, R. (2009). Aircraft noise-abatement and mitigation strategies. *Journal of Air Transport Management*, 15(1), 14-22.
- [25] Netjasov, F. (2012). Contemporary measures for noise reduction in airport surroundings. *Applied Acoustics*, 73(10), 1076-1085.
- [26] Gascó, L., Asensio, C., & de Arcas, G. (2017). Communicating airport noise emission data to the general public. *Science of the Total Environment*, 586, 836-848
- [27] ICAO. (2008). Doc. 9911 Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports.
- [28] ECAC. *ECAC Doc 29, 3rd Edition. Report on Standard Method of Computing Noise Contours around civil airports*. ECAC, 2005.
- [29] Ahearn, M., Boeker, E., Gorshkov, S., Hansen, A., Hwang, S., Koopmann, J., & Solman, G. B. (2016). *Aviation Environmental Design Tool (AEDT) Technical Manual Version 2b Service Pack 3* (No. DOT-VNTSC-FAA-16-11).
- [30] Thomann, G., Bütikofer, R., & Krebs, W. (2001). FLULA2-Ein Simulationsverfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. *Technische Programmdokumentation. Eidgenössische Materialprüfungs-und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Akustik, Bericht, (840), 143*.
- [31] Directive, E. U. (2002). Directive 2002/49/EC of the European parliament and the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise. *Official Journal of the European Communities, L, 189(18.07), 2002*.

- [32] AENA. (2018). Planes de aislamiento acústico. Retrieved from <http://www.aena.es/es/corporativa/planes-aislamiento-acustico.html>
- [33] Gagliardi, P., Teti, L., & Licitra, G. (2018). A statistical evaluation on flight operational characteristics affecting aircraft noise during take-off. *Applied Acoustics*, 134, 8-15.
- [34] ISO (1996). ISO 9613-2: Acoustics-Attenuation of sound propagation outdoors, Part 2: General method of calculation. *Geneva: International Organization for Standardization*.
- [35] Oliveira, V. (2016). *Urban morphology: an introduction to the study of the physical form of cities*. Springer.
- [36] Ariza-Villaverde, A. B., Jiménez-Hornero, F. J., & De Ravé, E. G. (2014). Influence of urban morphology on total noise pollution: Multifractal description. *Science of The Total Environment*, 472, 1-8.
- [37] Oliveira, M. I. F., & Silva, L. T. (2010). How urban noise can be influenced by the urban form. *8th WSEAS International Conference on Environment, Ecosystems and Development (EED'10)*, 31-36.
- [38] Guedes, I. C. M., Bertoli, S. R., & Zannin, P. H. T. (2011). Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in aracaju — brazil. *Science of the Total Environment*, 412–413, 66-76. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.018>
- [39] Qu, F., & Kang, J. (2017). Effects of built environment morphology on wind turbine noise exposure at building façades. *Renewable Energy*, 107, 629-638.
- [40] Donavan, P. R., & Lyon, R. H. (1974). Model Study of the Propagation of Sound from V/STOL Aircraft into Urban Environs. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55(2), 485-485.
- [41] Ismail, M. R., & Oldham, D. J. (2002). The effect of the urban street canyon on the noise from low flying aircraft. *Building Acoustics*, 9(3), 233-251. doi:10.1260/135101002320815693
- [42] Hao, Y., & Kang, J. (2014). Influence of mesoscale urban morphology on the spatial noise attenuation of flyover aircrafts. *Applied Acoustics*, 84, 73-82. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2013.12.001>
- [43] Lugten, M., Steemers, K., & Kang, J. (2016). An experimental study on the shielding performance of buildings exposed to aircraft noise comparing measurements near front and rear facades. *Internoise 2016*, Hamburg, Germany. 7180.
- [44] ISO, E. 12354–3: 2017. *Building Acoustics, Estimation of Acoustic Performance of Buildings from the Performance of Elements—Part, 3*.
- [45] ISO. 20906:2009, *Unattended Monitoring of Aircraft Sound in the Vicinity of Airports*. Genève: ISO, 2009

- [46] ISO. 1996-2:2009, Standard, Acoustics - Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise - Part 2 U.S.C. (2009).
- [47] Memoli, G., Paviotti, M., Kephelopoulos, S., & Licitra, G. (2008). Testing the acoustical corrections for reflections on a façade. *Applied Acoustics*, 69(6), 479-495.
- [48] Jagniatinskis, A., & Fiks, B. (2014). Assessment of environmental noise from long-term window microphone measurements. *Applied Acoustics*, 76, 377-385.
- [49] Montes González, D., Morillas, J. B., & Gozalo, G. R. (2015). The influence of microphone location on the results of urban noise measurements. *Applied Acoustics*, 90, 64-73.
- [50] Picaut, J., Le Pollès, T., L'Hermite, P., & Gary, V. (2005). Experimental study of sound propagation in a street. *Applied Acoustics*, 66(2), 149-173.
- [51] Barrigón, J. M., González, D. M., & Gozalo, G. R. (2016). A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. *Science of the Total Environment*, 565, 595-606.
- [52] Lyon, R. H. (1974). Role of multiple reflections and reverberation in urban noise propagation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 55(3), 493-503.
- [53] Li, K. M., & Tang, S. H. (2003). The predicted barrier effects in the proximity of tall buildings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 114(2), 821-832
- [54] Echevarría Sanchez, G. M., Van Renterghem, T., Thomas, P., & Botteldooren, D. (2016). The effect of street canyon design on traffic noise exposure along roads. *Building and Environment*, 97, 96-110.
- [55] Smith, M. J. (2004). *Aircraft noise* (Vol. 3). Cambridge University Press.
- [56] Ashford, N., Coutu, P., & Beasley, J. (2013). *Airport operations*. USA: Mc Graw Hill
- [57] AENA. (2017). Informe anual de impacto acústico 2016.
- [58] Licitra, G., Gagliardi, P., Fredianelli, L., & Simonetti, D. (2014). Noise mitigation action plan of pisa civil and military airport and its effects on people exposure. *Applied Acoustics*, 84, 25-36. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.02.020>
- [59] Gagliardi, P., Fredianelli, L., Simonetti, D., & Licitra, G. (2017). ADS-B System as a Useful Tool for Testing and Redrawing Noise Management Strategies at Pisa Airport. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(4), 543-551.
- [60] Brüel & Kjaer. Evaluator Type 7820. 2007
- [61] 01dB (2012) 01dB Dbtrait v 5.4.2 build 12
- [62] National Instruments. (1998) Labview User Manual. *Austin, TX*.

- [63] Asensio, C., Recuero, M., & Ruiz, M. (2012). Aircraft noise-monitoring according to ISO 20906. Evaluation of uncertainty derived from the classification and identification of aircraft noise events. *Applied Acoustics*, 73(3), 209-217.
- [64] SPSS Inc. (2013) IBM SPSS Statistics 22
- [65] Rosin, C. (2013). Uncertainty of aircraft noise measurements: Evaluation for an aircraft noise monitoring network. In *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings* (Vol. 247, No. 3, pp. 5024-5033). Institute of Noise Control Engineering.
- [66] Schlatter, F. & Wunderli, J.M. (2018) Relevance of buildings on aircraft noise predictions. Inter-Noise 2018
- [67] Wunderli, J. M., Zellmann, C., Köpfli, M., & Habermacher, M. (2018). sonAIR—a GIS-Integrated Spectral Aircraft Noise Simulation Tool for Single Flight Prediction and Noise Mapping. *Acta Acustica united with Acustica*, 104(3), 440-451.
- [68] Tarabini, M., Moschioni, G., Asensio, C., Bianchi, D., & Saggin, B. (2014). Unattended acoustic events classification at the vicinity of airports. *Applied Acoustics*, 84, 91-98.

7. ANEXOS

Para llevar a cabo los análisis, se midieron eventos de ruido de aviación en diversos puntos de cada una de las ciudades. Dichos eventos fueron clasificados en función de su ángulo de vista, topología de calle y de características propias de cada uno de los vuelos como la altitud y distancia de *slant* al punto de medición. A continuación se muestran las trayectorias con respecto a cada uno de los puntos de medición en función del análisis realizado. En Mejorada del Campo y Coslada, los vuelos eran aterrizajes, mientras que en el resto de los sitios los eventos medidos fueron despegues. Dichos eventos son mostrados en color rojo para los aterrizajes y verde para los despegues. Mientras que las posiciones de los micrófonos en fachada son mostradas como puntos verdes.

7.1 Análisis de ruido a lo largo de la fachada

7.1.1 Coslada

7.1.2 Mejorada del Campo

7.1.3 Pisa

7.2 Influencia de fachadas expuesta y sombra sobre el nivel de ruido en condiciones de referencia

Para obtener los factores de corrección para fachadas cubiertas y expuestas, se utilizaron cinco edificios en los que fue posible encontrar una posición adecuada de referencia para obtener los niveles de ruido de aviación en situaciones donde los obstáculos y superficies reflectantes tuvieran una influencia mínima. Los puntos de referencia son mostrados con puntos azules y los puntos de fachada mediante puntos verdes, mientras que las trayectorias son verdes para los aterrizajes y rojas para los despegues.

7.2.1 Mejorada del Campo

7.2.2 Pisa

7.3 Efectos del ángulo de *slant* γ sobre la propagación del ruido de aviación

Para comprobar el factor de corrección que especifica el Anexo B de la norma 1996-2, se buscaron posiciones que cumplieran con lo indicado en dicho Anexo. Se realizaron mediciones con un micrófono de referencia que midiera los niveles de presión sonora de los eventos de ruido de aviación en condiciones de campo libre y con un micrófono que midiera los niveles de cada evento frente a fachada. A continuación se muestran las posiciones y trayectorias medidas en San Sebastián de los Reyes, Mejorada del Campo, Algete y Pisa. Los despegues están dibujados como líneas verdes y los aterrizajes como líneas rojas, mientras que los puntos de referencia son puntos azules y los de fachada son puntos verdes.

7.3.1 San Sebastián de los Reyes

7.3.2 Mejorada del Campo

7.3.3 Algete

7.3.4 Pisa

7.4 Modelo de propagación de ruido de aviación en entornos urbanos

Para determinar un modelo que permitiera calcular el nivel de ruido en fachada a partir del nivel de ruido en la referencia, la topología de calle, el ángulo de vista y el ángulo de *slant*, se realizaron mediciones en sitios que contaran con todas estas variables. A continuación se muestran todas las posiciones en las que fueron realizadas las mediciones para llevar a cabo el análisis.

7.4.1 San Sebastián de los Reyes

7.4.2 Algete

7.4.3 Mejorada del Campo

7.4.4 Pisa

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A continuación, se muestran las definiciones de términos e índices de medida utilizados para llevar a cabo los análisis de ruido en esta tesis y facilitar su comprensión.

Término	Definición	Unidades
$L_{Aeq,1s}$	Nivel sonoro continuo equivalente ponderado A para un período de integración de 1s.	dBA
$L_{AE} = 10 \log \left(\frac{1}{T_n} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeq,1s}}{10}} \right)$	Nivel de exposición sonora. Permite evaluar los niveles sonoros generados por un evento de ruido. Se hace la integración de los niveles de ruido comprendidos entre el inicio el final del evento. Dicho valor se expresa con un tiempo de referencia de 1s.	dBA
$L_{AEreferenciai} = 10 \log \left(\frac{1}{T_n} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeqreferencia,1s}}{10}} \right)$	Nivel de exposición sonora del i-ésimo evento de ruido de aviación medido en la posición de referencia.	dBA
$L_{AEfachadai} = 10 \log \left(\frac{1}{T_n} \sum_i 10^{\frac{L_{Aeqfacha,1s}}{10}} \right)$	Nivel de exposición sonora del i-ésimo evento de ruido de aviación medido en la posición de fachada.	dBA
$L_{AEEd_xpromedio} = \frac{\sum_i^n L_{E,Afachadai}}{n}$	Media aritmética del nivel de ruido medido en fachada en el x-ésimo edificio.	dBA

$\Delta L_{AE\ fachadai}$ $\Delta L_{AE\ fachadai} = L_{AE\ Ed_x\ promedio} - L_{AE\ fachadai}$	Diferencia aritmética entre $L_{AE\ Ed_x\ promedio}$ y $L_{AE\ fachadai}$.	dBA
<p>Ángulo de vista</p>	Ángulo tridimensional formado por la altitud del vuelo, la línea descrita por la fachada donde se encuentra el punto de medición y la trayectoria de vuelo.	°
<p>Ángulo de slant</p>	Ángulo formado por la distancia horizontal perpendicular más corta desde el punto de medición hasta la trayectoria de vuelo y la altitud del vuelo.	°

PUBLICACIONES

En las siguientes páginas se encuentran copias de los artículos ya publicados al momento de la lectura de la tesis:

- Flores, R., Asensio, C., Gagliardi, P., & Licitra, G. (2019). Study of the correction factors for aircraft noise façade measurements. *Applied Acoustics*, 145, 399-407.
- Flores, R., Gagliardi, P., Asensio, C., & Licitra, G. (2017). A case study of the influence of urban morphology on aircraft noise. *Acoustics Australia*, 45(2), 389-401.