

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES**

**MONITORADO DE RUIDO DE AEROPUERTOS:
Técnicas de detección, clasificación e identificación
de ruido de aeronaves como causantes de
incertidumbre en la medida**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA ACÚSTICA
EN LA INDUSTRIA Y EL TRANSPORTE**

Autor:

César Asensio Rivera

Directores del Trabajo Fin de Máster:

Dr. Manuel Recuero López / Dr. Mariano Ruíz González

2011

Tribunal nombrado por la Junta de Escuela de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 20__.

Presidente D. _____

Vocal D. _____

Secretario D. _____

Realizado el acto de defensa y lectura del Trabajo Fin de Máster el ____ de _____ de 20__

Calificación: _____

El Presidente

El secretario

Agradecimientos

La realización de este máster ha supuesto un esfuerzo personal importante, que en determinados momentos ha provocado desajustes en la cotidianeidad familiar. Por este motivo mis primeros pensamientos sólo pueden ser para mi esposa y mis hijas, a las que agradezco su cariño, sacrificio y comprensión. Ya queda menos...

Por otra parte me gustaría expresar mi agradecimiento a Manuel Recuero, porque él ha diseñado, implementado y mantenido un entorno en el que uno sólo puede crecer y desarrollarse. Me siento muy afortunado por estar dentro de dicho entorno.

Mi agradecimiento también para Mariano Ruiz, que ha sido, y seguro que seguirá siendo, un apoyo fundamental, cuya guía y comprensión me ha sido de gran ayuda en innumerables ocasiones.

A Raúl y a Nacho, al resto del grupo de acústica del INSIA, a Labenac, a Lacainac..., gracias.

También quisiera agradecer a todos los que de forma desinteresada han participado en el ejercicio de intercomparación que ha dotado de contenido a este trabajo fin de máster.

Y por último, gracias también a todos los que han hecho posible la implantación e impartición de este máster.

CÉSAR

RESUMEN

Uno de los aspectos más importantes en los sistemas de monitorado de ruido de aviones se refiere a la correcta detección y marcado de los eventos sonoros causados por los aviones en los ficheros de medida, ya que esto tiene una influencia en los resultados reportados. En la reciente ISO 20906 (referida al monitorado desatendido de ruido de aviones en las proximidades de los aeropuertos) el marcado queda dividido en un tarea de detección de eventos sonoros a partir de la evolución temporal del nivel sonoro generado, una tarea de clasificación de aquellos eventos sonoros posiblemente causados por aviones, y una identificación final de los eventos asociados a ruido de aviones basada en características no acústicas (por ejemplo, seguimiento radar).

Las tasas de acierto asociadas a estas tareas contribuirá a la incertidumbre de los resultados reportados, pero existen otros factores subyacentes, que derivados del proceso de marcado, tendrán una influencia en los resultados reportados, incrementando la incertidumbre.

Tomando como base un ejercicio de intercomparación, se diseñó un experimento para evaluar cuáles son los factores que influyen en las tareas de marcado, cuantificando dicha contribución sobre los resultados del monitorado en algunos casos particulares. Diferentes técnicos, con tres grados distintos de experiencia, analizaron varios ficheros de medida, registrados en tres localizaciones afectadas por ruido de sobrevuelos. El análisis se realizó considerando tres casos: los técnicos disponen de las grabaciones además de las medidas, los técnicos disponen de una lista de eventos además de las medidas, o los técnicos sólo disponían de las medidas.

Cinco universidades europeas y más de 60 participantes estuvieron involucrados en este ejercicio de intercomparación entre laboratorios.

En lo que se refiere específicamente a las tareas de marcado, los resultados mostraron que no existen diferencias significativas en los resultados derivadas de factores tales como la institución a la que pertenece el participante, o el nivel de experiencia del participante. Sin embargo, otros factores como el rango de los eventos sonoros, la ausencia de información no acústica o el tipo de ayuda al marcado empleada, sí tienen una influencia significativa en las tareas de marcado, lo que en algunos casos puede incrementar la incertidumbre de los resultados, o incluso desviar los resultados globales.

PALABRAS CLAVE: Ruido de aviones, monitorado de ruido, detección, clasificación, identificación, incertidumbre, intercomparación

ABSTRACT

One of the most important issues in aircraft noise monitoring systems is the correct detection and marking of aircraft sound events through the measurement profiles, as this influences the reported results. In the recent ISO20906, (Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports) this marking task is split into: detection from the sound level time history, classification of probable aircraft sound events, and the concluding identification of aircraft sound events through non-acoustic features (for instance, radar tracking).

The error rates of these tasks will contribute to the uncertainty of the measurement results, but there are other underlying factors that, derived from the marking process, will have an influence on the reported results, increasing the uncertainty.

On the basis of interlaboratory comparison exercises, it was designed an experiment to evaluate the factors that influence the marking tasks, quantifying their contribution to the uncertainty of the reported monitoring results for some specific cases. Several noise time histories, recorded in three different locations affected by flyover noise, were analyzed by practitioners classified according to three different expertise levels. The analysis was carried out considering three types of complementary information: noise recordings, list of aircraft events and no information at all.

Over 60 participants from five European universities were involved in this interlaboratory comparison.

The results showed that, regarding the marking task, there were no significant differences in the results derived from factors such as the participant's institution or participant's expertise. Nonetheless other factors, like the noise event range, the absence of non-acoustic help or the type of help used for marking, have a significant influence on the marking tasks, leading to a contribution to the uncertainty of the reported monitoring for some cases and definitely to the changes in the overall results.

KEYWORDS: Aircraft noise; noise monitoring; detection; classification; identification; uncertainty; interlaboratory comparison

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	El ruido en aeropuertos.....	1
1.1.1	Monitorado y evaluación del ruido en aeropuertos	2
1.1.2	Métodos de discriminación de eventos sonoros	12
1.2	Incertidumbre en el monitorado de ruido de aviones	18
1.3	Objetivos.....	22
2	METODOLOGÍA	23
2.1	Detección como motivo de incertidumbre	23
2.1.1	Diseño del experimento	24
2.1.2	Análisis de los factores de influencia	35
2.1.3	Estimación de la incertidumbre asociada a la detección.....	50
3	RESULTADOS	53
3.1	Cuantificación de la Incertidumbre estandar de detección	53
4	CONCLUSIONES	55
5	BIBLIOGRAFÍA	59
6	ANEXOS	63
6.1	Terminología referente a la evaluación del ruido	63
6.2	Conceptos estadísticos	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Monitor de ruido	1
Figura 2. Registro sonoro correspondiente al paso de un avión.	2
Figura 3. Terminales de monitoreo de ruido	3
Figura 4. Evolución temporal del nivel sonoro	4
Figura 5. Comparación de eventos sonoros mediante L_{Amax} y L_E	5
Figura 6. Integración realizada por el Nivel de exposición sonora	6
Figura 7. Evolución temporal de múltiples eventos sonoros.....	6
Figura 8. Nivel equivalente en función de la duración de la medida	9
Figura 9. Nivel equivalente utilizando intervalos de referencia estándar.....	10
Figura 10. Ruido específico, residual, total.....	12
Figura 11. Discriminación de los eventos sonoros de aviones según la ISO 20906.....	13
Figura 12. Esquema de un sistema de monitoreo de ruido integrado en un aeropuerto	17
Figura 13. Efecto del ángulo de incidencia del sonido.....	20
Figura 14. Efecto del ruido residual sobre la medida	20
Figura 15. Instantes de inicio y final del suceso sonoro	23
Figura 16. Registro de medida en la localización MEJ	27
Figura 17. Registro de medida en la localización MOL.....	28
Figura 18. Registro de medida en la localización LOE.....	28
Figura 19. Localización de los puntos de medida.	29
Figura 20. Modificaciones aplicadas sobre los ficheros originales	32
Figura 21. Distribución de las observaciones en función del archivo analizado.....	36
Figura 22. Resultados reportados por los expertos.....	36
Figura 23. Distribución del error en función del archivo analizado	37
Figura 24. Gráfico de probabilidad normal	39
Figura 25. Gráfico de normalidad	39
Figura 26. Gráfico de cajas, con respecto al factor Institución	40
Figura 27. Factor experiencia (inicial, 3 clases).....	41
Figura 28. Factor "método de marcado".....	43

Figura 29. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 1	44
Figura 30. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 2.....	44
Figura 31. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 3.....	45
Figura 32. Rango de un evento sonoro	46
Figura 33. Efecto del rango del evento sobre la medida	48
Figura 34. Efecto del entorno acústico	49
Figura 35. Gráfico de interacción entre los factores.....	50
Figura 36. Funciones de distribución de la variable error	53
Figura 37. Efecto del ruido de fondo.....	65
Figura 38. Efecto del ruido residual	65
Figura 39. Gráficos de interacción	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de estandarizar los resultados respecto a un intervalo de referencia	9
Tabla 2. Factores de influencia.....	24
Tabla 3. Participantes e instituciones	26
Tabla 4. Descripción de las localizaciones de medida	27
Tabla 5. Descripción de los ficheros utilizados	31
Tabla 6. Formulario reportado por los participantes	33
Tabla 7. Valor verdadero de los entornos acústicos	37
Tabla 8. Estadística descriptiva de la variable error	38
Tabla 9. Test de bondad del ajuste	38
Tabla 10. Test de Kruskal-Wallis para el " Factor Institución"	41
Tabla 11. Test de Kruskal-Wallis para "Factores de experiencia (3 niveles)"	42
Tabla 12. Descripción de los rangos asociados a los entornos acústicos	49
Tabla 13. Intervalos de credibilidad para el error.....	54
Tabla 14. Incertidumbre expandida (U_{detect})	54
Tabla 15. Incertidumbre estándar (u_{detect})	54

1. INTRODUCCIÓN

1 INTRODUCCIÓN

1.1 EL RUIDO EN AEROPUERTOS

Los aeropuertos son infraestructuras del transporte que ineludiblemente están asociadas a la emisión de niveles sonoros elevados. A lo largo de las últimas décadas, los problemas de contaminación acústica asociados al transporte aéreo han aumentado debido por un lado al crecimiento de las poblaciones cercanas a estos, y al aumento continuado de las necesidades de transporte tanto de pasajeros como de mercancías.

El aumento de la población afectada, así como la creciente preocupación en materia medioambiental han situado esta fuente de ruido y sus efectos en el foco de investigaciones en referencia a los efectos del ruido (Fidell et al. 2000, Morrell et al. 2000, Franssen et al. 2004, Black et al. 2007), así como han propiciado un continuo desarrollo de herramientas destinadas a la gestión y mitigación del ruido (Girvin 2009, Bekebrede et al. 1984, Nero et al. 2000, May et al. 2006). Entre ellas, los sistemas de monitorado de ruido realizan una labor muy importante, ya que permiten evaluar el ruido producido por la actividad, ajustar y validar los modelos de simulación y predicción de ruido, desempeñando a su vez un papel fundamental en lo referente a la información al público.



Figura 1. Monitor de ruido

La figura (Marshall Day Acoustics) muestra la instalación de un trípode sustentando el micrófono de un monitor de ruido, junto a una vivienda coincidiendo con el aterrizaje de un avión.

En los siguientes apartados se ofrece una visión global de la problemática asociada a la medición del ruido provocado por los aviones, y se describen los principales métodos existentes

1. INTRODUCCIÓN

para la evaluación del ruido en las proximidades de aeropuertos, poniendo de manifiesto el papel fundamental que desempeñan los mecanismos de discriminación de fuentes.

1.1.1 Monitorado y evaluación del ruido en aeropuertos

Entre las diferentes actividades ruidosas que se producen en el aeropuerto cabe destacar las operaciones de despegue y aterrizaje, debido principalmente a los siguientes factores:

- Generación de niveles acústicos muy elevados, especialmente en el despegue.
- Proximidad a las viviendas, por lo que la atenuación del sonido durante su propagación puede resultar insuficiente.

Durante este tipo de operaciones el sonido registrado en la posición de un receptor cualquiera sigue un patrón común: el nivel sonoro se incrementa a medida que el avión se acerca, y tras llegar a un valor máximo, el nivel sonoro vuelve a descender hasta los valores correspondientes al nivel residual. En la figura 2 observamos una gráfica correspondiente al registro sonoro capturado por un micrófono, y queda resaltado, a modo de ejemplo, uno de los sucesos sonoros correspondiente al paso de un avión.

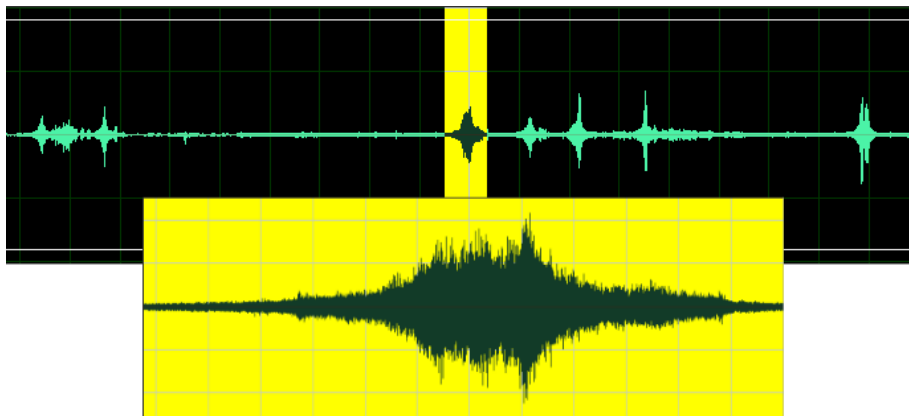


Figura 2. Registro sonoro correspondiente al paso de un avión.

La presión sonora producida por cualquier fuente sonora varía sobre un valor de presión estática. Dicha fluctuación es recogida por el micrófono, y la señal eléctrica generada puede ser medida con un sonómetro, grabada mediante una grabadora, o representada gráficamente. Al paso de un avión (resaltado en amarillo), la amplitud de la señal registrada aumenta debido al incremento de la energía acústica presente.

Los monitores de ruido (figura 3) son los instrumentos encargados de medir el ruido y evaluarlo conforme a la metodología que se describe a continuación. Están compuestos por un micrófono, que capta la señal acústica y la convierte en una señal eléctrica. Gracias al preamplificador, dicha señal es insertada en el sistema de medida, que se encarga de obtener los indicadores adecuados. Por tratarse de sistemas para su uso en exteriores, el micrófono debe contar con elementos de protección que lo capaciten para su uso en intemperie. Dichos elementos deben proteger el micrófono de la lluvia, viento, pájaros,...

1. INTRODUCCIÓN

Además, dichos monitores deben instalarse a una altura elevada sobre el suelo, y lejos de otras superficies reflectantes, minimizando la influencia de las reflexiones en la medida.



Figura 3. Terminales de monitorado de ruido

Un terminal de monitorado de ruido consiste en un sistema de medición de ruido (sonómetro) especialmente adaptado para la medición autónoma en intemperie.

La medición de dicho sonido, se realiza mediante un registro continuo de mediciones cortas (habitualmente 1 segundo), y consecutivas, que permite evaluar la evolución temporal del nivel sonoro, en decibelios (normalmente dBA). A modo de ejemplo, la figura 4 muestra una gráfica de aproximadamente 5 minutos de duración, de los que 1,5 minutos se corresponden con el paso del avión. Cada punto de esta gráfica se corresponde con una medición de 1 segundo de duración, lo que permite observar segundo a segundo como el nivel aumenta a medida que se acerca el avión hasta alcanzar un máximo, y desciende a partir de ese momento (a medida que el avión se acerca).

1. INTRODUCCIÓN

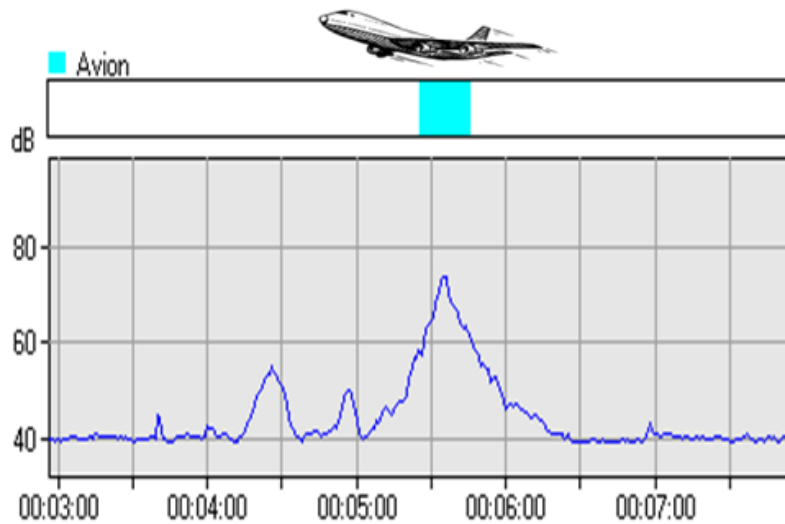


Figura 4. Evolución temporal del nivel sonoro

El monitoreo de ruido de aviones se realiza mediante un registro continuo de medidas de corta duración (típicamente 1 segundo). De esta manera se obtiene una evolución temporal que permite observar los incrementos de nivel sonoro asociados a cada avión, y marcar los sucesos sonoros. En la figura, se ha marcado en azul celeste el evento sonoro producido por el avión. Las mediciones comprendidas dentro de ese intervalo servirán para obtener un indicador correspondiente a dicho evento.

Esta gráfica de evolución temporal es la base que sustenta cualquier medición relacionada con el ruido de aviones, ya que se utiliza con dos objetivos básicos:

- Detectar eventos (sucesos) sonoros: cuando el nivel sonoro se eleva por encima de un umbral, durante un tiempo predefinido, queda marcado un suceso sonoro.
- Medir el suceso sonoro: a partir de las mediciones de 1 segundo, y una vez definidos los instantes de inicio y final del evento sonoro, se obtienen nuevos indicadores que describen el evento en su totalidad.

Por lo tanto, a partir de los registros efectuados por el instrumento de medida (sonómetro integrador promediador), se calculan unos descriptores para cada suceso aislado. Como descriptores, la norma internacional ISO 1996-1(ISO 2003) recomienda utilizar los siguientes:

- El nivel de presión sonora máximo, que describe el instante en el que el sonido alcanza su mayor nivel, sin valorar en absoluto el resto del evento. Es habitual referirse a este índice como L_{Amax} (dBA).
- El nivel de exposición sonora, por el contrario, integra la totalidad de la energía acústica registrada entre el instante de inicio y finalización del suceso sonoro, y expresa dicho resultado de manera estandarizada. Es habitual referirse al nivel de exposición sonora como L_E (dBA).
- El nivel de presión acústica de pico: en desuso en acústica ambiental.

Resulta necesario indicar la duración de los sucesos, ya que la molestia generada por un sonido no depende únicamente del nivel máximo alcanzado, sino también de su duración. No obstante, el nivel de exposición sonora combina en un único descriptor el nivel acústico y la

1. INTRODUCCIÓN

duración del evento, lo que le hace idóneo para valorar y comparar eventos sonoros aislados de distintas duraciones.

La figura 5 pretende poner de manifiesto las diferencias entre el nivel de presión sonora máximo y el nivel de exposición sonora. Como se puede apreciar, los dos eventos coloreados alcanzan el mismo nivel sonoro en su máximo (idéntico nivel de presión sonora máximo). Dicho máximo puede ser descrito mediante el nivel de presión sonora máximo, que en este caso es 80.3 dBA ($L_{Amax}=80.3$ dBA). Sin embargo este indicador ignora la duración de los eventos, y por lo tanto, atendiendo a este indicador, los dos eventos son iguales. Sin embargo, de manera general, cuanto más dura un evento sonoro más molestias origina en la población, por lo que dicho efecto temporal no debe ignorarse. Así, el nivel de exposición sonora integra la energía existente en el evento (parte coloreada), y la estandariza con respecto a una duración única (1 segundo). Por lo tanto, el evento coloreado en azul, al tener una mayor duración, presenta un mayor nivel ($L_E=88.6$ dBA), que el coloreado en rojo ($L_E=84.9$ dBA).

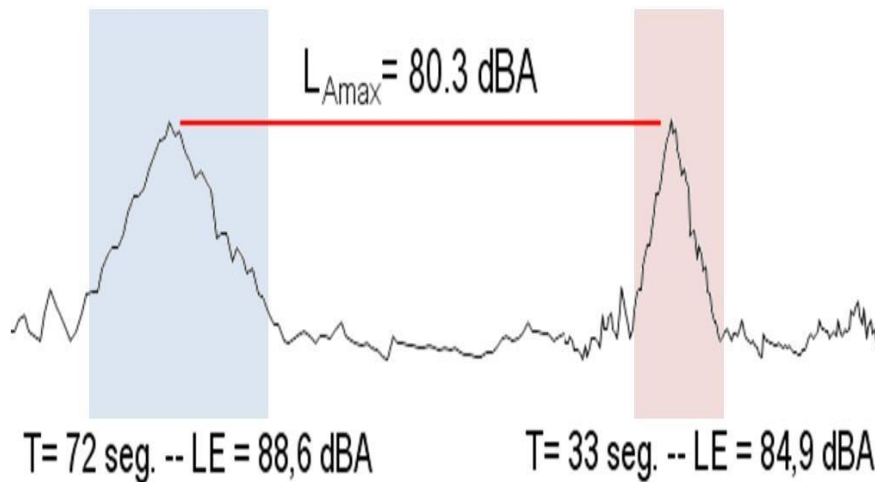


Figura 5. Comparación de eventos sonoros mediante L_{Amax} y L_E

El indicador nivel sonoro máximo tan sólo evalúa un instante del suceso sonoro (en el que se produce su máximo) esto provoca que los dos sucesos de la figura sean valorados con una misma cifra, siendo ignorado el efecto de su duración. Por el contrario, el nivel de exposición sonora, integra la totalidad de la energía acústica existente lo que pone de manifiesto cuál de los dos eventos resulta más “ruidoso”.

En definitiva, el nivel de exposición sonora permite estandarizar la dosis de ruido producida por un avión de manera aislada, ya que analiza el total de la energía como si estuviera concentrada en una duración estándar de 1 segundo (figura 6).

1. INTRODUCCIÓN

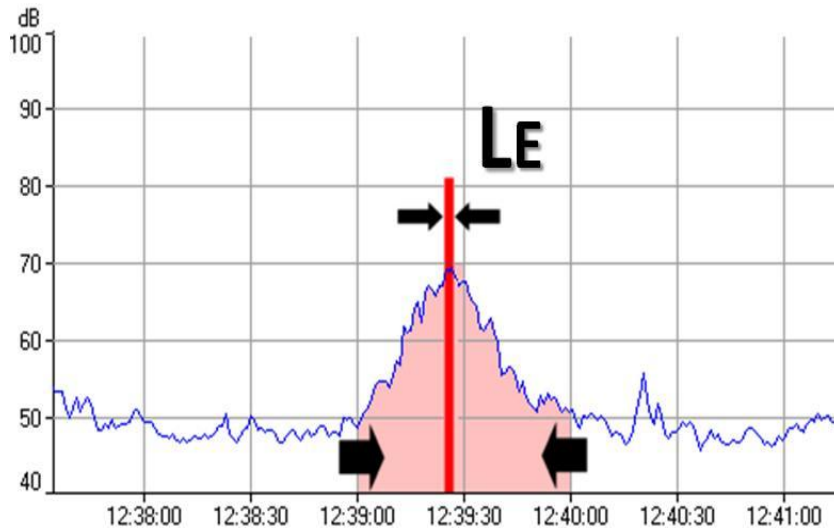


Figura 6. Integración realizada por el Nivel de exposición sonora

El nivel de exposición sonora se calcula integrando la totalidad de la energía existente entre los momentos de inicio y finalización de la medida, y promediando con respecto a una duración de referencia de 1 segundo.

Cuando se pretende evaluar el ruido producido por múltiples sucesos sonoros, en la norma ISO 1996 se indica: la descripción de todas las fuentes de ruido de sucesos aislados repetitivos (como el ruido de aviones) utiliza los niveles de exposición sonora de los ruidos de un suceso aislado y el número correspondiente de sucesos para determinar el nivel de presión sonora continuo equivalente, L_{AeqT} , donde T es el intervalo de referencia de la evaluación (p.ej., en el caso de aplicación, 8 horas para el período nocturno).

La siguiente explicación pretende aclarar el párrafo anterior. Para ello, en la figura 7 se ilustra la evolución temporal del nivel sonoro en un punto de medida por el que pasan diversas aeronaves (marcadas en rojo).

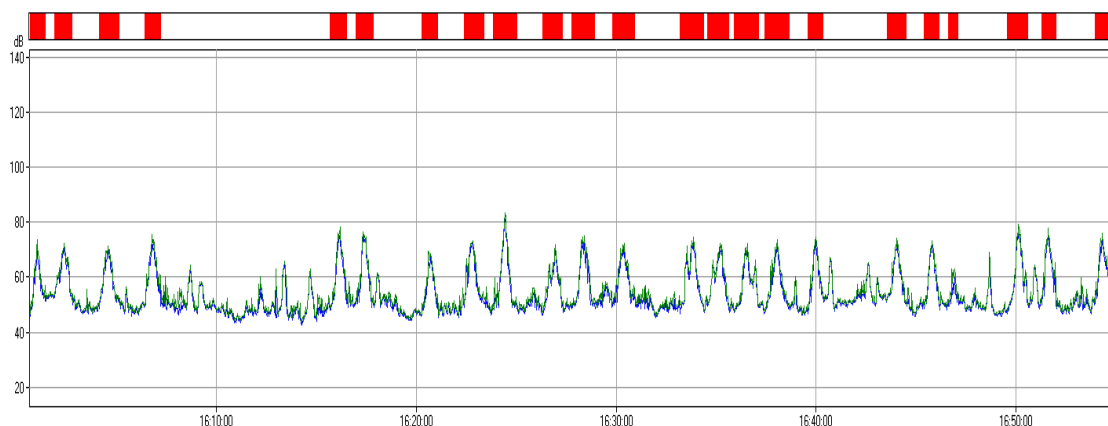


Figura 7. Evolución temporal de múltiples eventos sonoros

Sobre la evolución temporal del nivel sonoro resulta posible detectar todos los eventos sonoros ocurridos (tanto de forma manual, como de forma automática), y posteriormente deberán ser clasificados e identificados.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del nivel de exposición sonora conlleva la obtención de un listado de valores, cada uno de ellos asociado a un evento sonoro. Para evaluar la infraestructura, no es posible centrarse únicamente en el avión más ruidoso, e ignorar el resto de los aviones, ya que se llegaría a la paradoja de que resulta igual de molesto un aeropuerto en el que hay una operación, que uno en el que hay 10, ó 100, ó 1000... Por lo tanto, debe evaluarse el ruido que producen conjuntamente todos los aviones, y debe evaluarse conforme a un intervalo de referencia homogéneo y estandarizado (tal y como define la ISO 1996-1). Durante años ha sido habitual la existencia de dos períodos de referencia, que se corresponden con el período diurno (en España comprendido entre la 07h y las 23h) y nocturno (en España comprendido entre las 23h y las 7h). La legislación más actualizada, siguiendo las recomendaciones y regulaciones europeas, en lugar de dos establece tres intervalos de referencia: día (07 – 19 h), tarde (19 – 23 h) y noche (23 - 07 h).

El nivel de presión sonora continuo equivalente (nivel equivalente) es el indicador que, calculado a partir de los eventos sonoros, y para un intervalo de referencia, permite evaluar la contaminación acústica producida por el conjunto de todos los eventos sonoros aislados (aviones). Este indicador permite evaluar conjuntamente, con una única cifra, y de manera totalmente objetiva y repetible, el número de operaciones, su duración y la dosis de ruido de todas ellas. Para ello se integra la dosis producida por todos y cada uno de los aviones (L_E), y se estandariza con respecto al intervalo de referencia. Por lo tanto, el nivel equivalente permite estandarizar respecto al intervalo de referencia la dosis de ruido producida por todos los aviones de manera conjunta

Por ejemplo, imaginemos un aeropuerto en el que todas las operaciones producen exactamente el mismo ruido en un punto de medida p. El nivel sonoro de cada operación sería exactamente el mismo, supongamos que $L_E=100$ dBA, con un nivel medio de 85 dBA por cada sobrevuelo ($L_{Aeq, flyover}$), y una aportación al promedio diurno (intervalo de referencia de 7 a 23h) de, aproximadamente, 52 dBA. En estas condiciones, el día que se produce tan sólo una única operación el ruido promedio diurno ($L_{Aeq, día}$) se correspondería con los 52 dBA. El día en que hubiera 10 operaciones este mismo indicador marcaría 62 dBA, con 100 operaciones 72 dBA... Por el contrario, si no se integrara con respecto al intervalo de referencia, y únicamente se usara el nivel medido durante el sobrevuelo, se obtendría un valor idéntico todos los días, $L_{Aeq, flyover}$, quedando fuera de la valoración el número de operaciones. Por ese motivo, la legislación ajusta sus límites con este indicador, integrando respecto a los intervalos de referencia.

Siguiendo la metodología descrita hasta este momento se podría determinar el ruido que generaron los aviones durante el intervalo diurno o nocturno de un día cualquiera del año, siendo este dato representativo tan sólo de ese día, por lo tanto difícilmente se ajustará a una descripción del ambiente sonoro general existente en la zona. Por este motivo, para poder recoger todas las condiciones de funcionamiento de las fuentes sonoras (aeropuerto), y valorar la contaminación acústica provocada de manera inequívoca, la norma ISO 1996-1 define un parámetro más, que es el intervalo a largo plazo, que es fijado por las autoridades responsables (en Europa es 1 año), y que establece el tiempo en el que se promedia o evalúa el ruido de una serie de intervalos de referencia.

1. INTRODUCCIÓN

Es función del legislador establecer límites de ruido, pero dichos límites están ajustados con este indicador: nivel sonoro equivalente en el largo plazo. Y por lo tanto, este indicador es el que debe ser reportado por los sistemas de monitorado de ruido en las infraestructuras del transporte.

Este índice es el que se analiza cuando se elaboran mapas de ruido, no sólo en el caso de ruido de aeropuertos, también en el caso de ruido industrial, ruido de tráfico y tráfico ferroviario. Es el indicador al que se refieren los principales documentos de referencia a nivel internacional (ISO 2007, ISO 1987, European Parliament 2002, WHO 1999, RD 2007, IMAGINE WP2 partners 2006, Ley 2003). Así mismo, dicho indicador es el que se menciona en la principal norma de referencia para el monitorado de ruido de aviones: ISO 20906: Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports(ISO 2009).

El nivel equivalente, por definición, admite múltiples interpretaciones y acepciones, que pueden dar lugar a malos entendidos e interpretaciones sesgadas. Si no se estandariza un intervalo de referencia, la evaluación de un único evento sonoro, podría ser diferente en función del criterio del técnico que realice las mediciones. En la figura 8 se muestra el nivel equivalente del mismo evento sonoro en función de la duración de la medida, y del momento de inicio de la misma. Las franjas coloreadas muestran el intervalo seleccionado en cada caso. Como puede observarse, el método resulta poco repetible, ya que, al no existir un intervalo de referencia, el resultado de la valoración depende enormemente de la duración concreta de la medida, y por lo tanto distintos técnicos con diferentes criterios podrán medir el mismo avión obteniendo resultados correctos y diferentes (entre 79,4 y 72,5 dBA). Además, incluso en el caso de que la duración de la medida sea la misma, si esta resulta ser demasiado corta, pueden obtenerse resultados muy distintos. Esto sucede en las dos primeras gráficas que muestran 0,7 dBA de diferencia sólo achacable a una demora de tan sólo 2 segundos en el inicio de la medida.

Sin embargo, al utilizar un intervalo de referencia para estandarizar los resultados, el método gana en consistencia, ya que la duración real de la medida pierde importancia, siempre y cuando se haya medido la parte que de verdad contiene más. Por lo tanto los resultados tienen una dispersión mucho menor. En la Tabla 1 se muestra el efecto de la estandarización (verde), frente a su ausencia (amarillo).

1. INTRODUCCIÓN

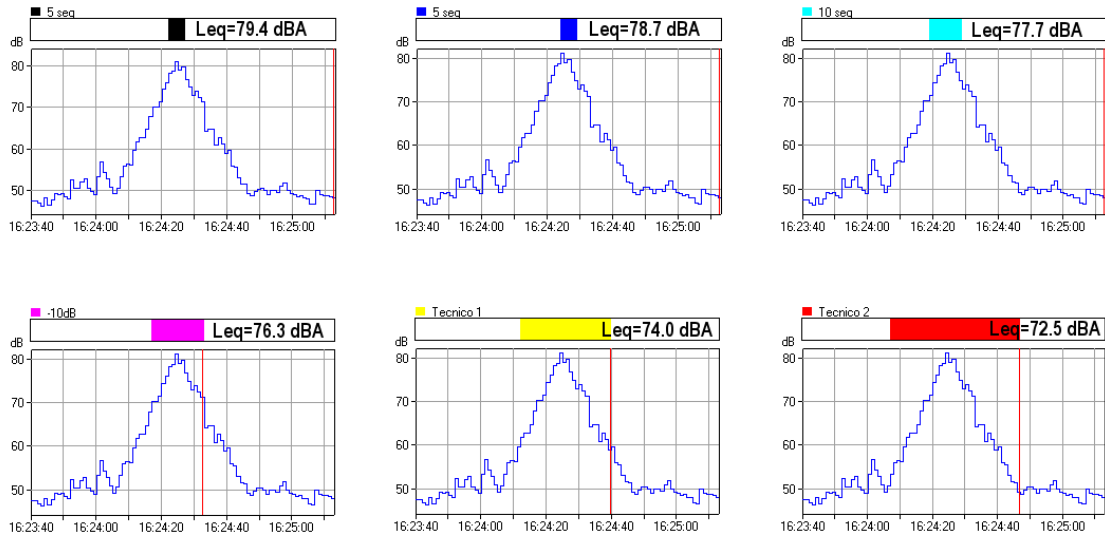


Figura 8. Nivel equivalente en función de la duración de la medida

El nivel equivalente de un mismo suceso sonoro puede variar sustancialmente en función de la duración considerada en la medida, por lo que resulta necesario estandarizar un período de referencia. Además, si la medida no es suficientemente larga, el momento de inicio de la misma también puede alterar los resultados.

Tabla 1. Efecto de estandarizar los resultados respecto a un intervalo de referencia

		Intervalo de referencia no estandarizado, cada técnico estandariza respecto al tiempo de medida. GRAN DISPERSIÓN EN LOS RESULTADOS		Intervalo de referencia estandarizado, todos los técnicos estandarizan con respecto al mismo intervalo en segundos (en este caso 1s). POCA DISPERSIÓN EN LOS RESULTADOS, SIEMPRE QUE EL TIEMPO DE MEDIDA SEA SUFICIENTE	
Hora de inicio medida	Duración medida (s)	Intervalo referencia (s)	L_{aeq} (dBA)	Intervalo referencia (s)	L_{aeq} (dBA)
16:24:22	5,0	5,0	79,4	1,0	86,4
16:24:24	5,0	5,0	78,7	1,0	85,7
16:24:19	10,0	10,0	77,7	1,0	87,7
16:24:17	16,0	16,0	76,3	1,0	88,3
16:24:12	28,0	28,0	74,0	1,0	88,5
16:24:07	40,0	40,0	72,5	1,0	88,5

Como puede observarse, la dispersión de los resultados queda muy reducida al estandarizar el intervalo de referencia, y resulta prácticamente nula cuando los intervalos de medida son suficientemente largos (como en las tres gráficas inferiores: 88.3, 88.5 y 88.5 dBA). Por lo tanto, utilizando un intervalo de evaluación de referencia, se consigue reducir la dispersión de los resultados, consiguiendo un método estandarizado, mucho más consistente, homogéneo y repetible.

1. INTRODUCCIÓN

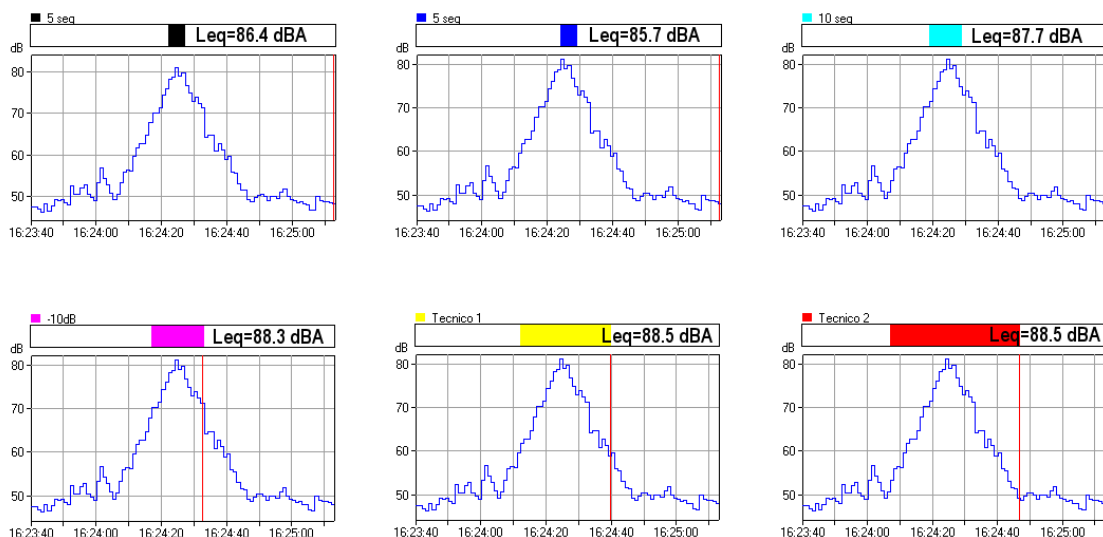


Figura 9. Nivel equivalente utilizando intervalos de referencia estándar

Al estandarizar los resultados con respecto a una duración de referencia (en este caso 1 segundo), se reduce la dispersión de los resultados. Cuando el período de medida es suficientemente largo los resultados apenas varían, al contrario de lo que ocurría cuando cada medida se promediaba con respecto a una duración distinta.

La selección del intervalo de referencia es un factor secundario, ya que dicho intervalo se aplica tanto a las mediciones como a los límites, y por lo tanto su importancia relativa es muy pequeña. Las recomendaciones y la regulación internacional tradicionalmente venían estableciendo dos intervalos de referencia diferentes, intervalo de referencia diurno (57600 segundos correspondientes a 16 horas), e intervalo de referencia nocturno (28800 segundos, correspondientes a 8 horas). De esta manera se pueden establecer diferentes límites, para garantizar un mayor grado de protección durante el período de descanso de las personas.

Por último, debe introducirse el concepto de evaluación en el largo plazo. El impacto acústico producido por las infraestructuras del transporte debe evaluarse en un intervalo a largo plazo, que caracterice el entorno acústico predominante en la zona. La determinación de un nivel sonoro equivalente promedio anual, permite a los gestores de la infraestructura adoptar medidas de control o planes de acción que minimicen la afección producida por el ruido. Por ejemplo, este es uno de los principales fines que se persiguen con la elaboración de mapas de ruido, y la determinación de huellas sonoras o isófonas de aeropuertos.

Este es el motivo por el que las declaraciones de impacto ambiental deben regular con respecto al nivel sonoro equivalente promedio anual, para poner de manifiesto si el ambiente acústico generalizado supera unos límites.

Un factor de protección adicional implicaría regular no sólo sobre los valores promedio, sino acotar también las emisiones diarias. La legislación más avanzada y actualizada (por ejemplo, el Real Decreto 1367/2007) ya contempla esta posibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

En estas condiciones, los únicos parámetros definidos que tienen valores límites asociados son el nivel equivalente anual para el período de día y el nivel equivalente anual para el período de noche. Dichos indicadores pueden ser obtenidos mediante una evaluación de 365 días (monitorado en continuo), o pueden ser obtenidos mediante técnicas de muestreo. En este último caso, los indicadores no son medidos, sino estimados, y dichas estimaciones deben tener en consideración las diferentes condiciones existentes a lo largo del año respecto a los siguientes aspectos:

- Configuraciones de funcionamiento del aeropuerto. Debe tenerse en cuenta las diferentes configuraciones de funcionamiento del aeropuerto, con sus correspondientes frecuencias de aparición.
- Nivel de actividad del aeropuerto. Debe considerarse los diferentes escenarios existentes en el aeropuerto, producidos por ejemplo por periodos vacacionales, con sus respectivas frecuencias de aparición.
- Condiciones meteorológicas, ya que marcan la atenuación del sonido durante su propagación entre el avión y el punto de medida.

De esta manera se obtiene múltiples escenarios, correspondientes a la combinación de los diferentes factores, debiendo ser cada uno de ellos suficientemente caracterizados mediante mediciones.

Una medición en el momento más desfavorable, de mayor nivel de ruido, o una medición aleatoria, no son por sí solas representativas del largo plazo, con lo que no permiten establecer ningún tipo de conclusiones con respecto a los índices anuales.

1. INTRODUCCIÓN

1.1.2 Métodos de discriminación de eventos sonoros

En el caso que nos afecta, resulta fundamental ser capaz de discriminar la aportación sonora de los aviones frente a otras fuentes de ruido. En este sentido, tanto en la norma ISO 1996 como en la ISO 20906 se definen los conceptos ruido específico, ruido residual y ruido total. El ruido total incluye el sonido procedente de todas las fuentes de ruido existentes, mientras que el ruido específico se limita a la aportación de la fuente bajo estudio, en este caso los aviones. La diferencia entre ambos es lo que llamamos ruido residual.

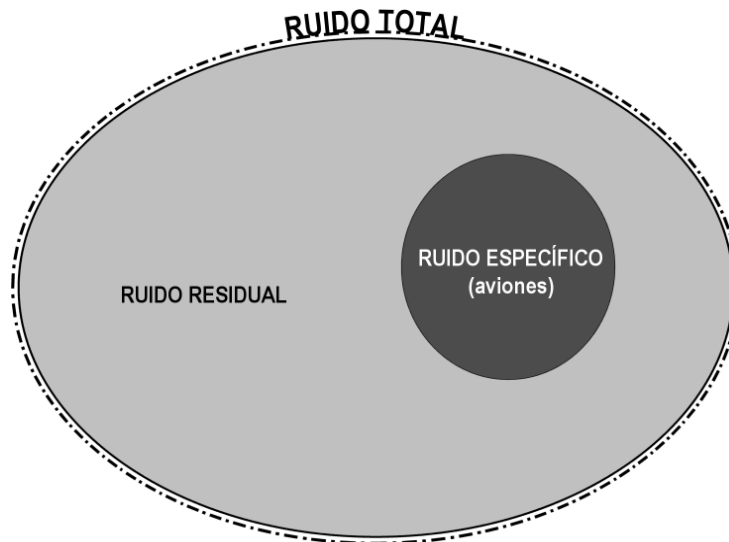


Figura 10. Ruido específico, residual, total

Cuando se evalúa ruido ambiental es habitual tener especial interés en una fuente de ruido concreta, y es necesario evaluar la aportación de ese ruido específico. Sin embargo, los instrumentos miden el ruido total captado por el micrófono. Por lo que será necesario aplicar procedimientos alternativos para discriminar que parte de la medida corresponde al ruido específico y que parte al ruido residual.

Uno de los principales retos en el monitorado desatendido de ruido de aviones consiste en la discriminación del ruido específico de los aviones frente al ruido residual, ya que el objetivo consiste en evaluar la aportación de los aviones al ambiente sonoro global, independizando esta de otras posibles fuentes de ruido que pudieran existir en la zona. Con este objetivo, el monitorado de ruido de aviones, como ya se ha comentado, se realiza mediante un registro continuo de mediciones cortas (habitualmente 1 segundo), y consecutivas, que permite evaluar la evolución temporal del nivel sonoro (ver figura 4).

Es precisamente la evolución temporal la que sustenta cualquier medición relacionada con el ruido de aviones, ya que se utiliza para medir los eventos sonoros (una vez definidos los instantes de inicio y final del evento sonoro) y además puede servir para detectar los propios eventos (mediante aplicación de umbrales).

1. INTRODUCCIÓN

La norma ISO 20906 divide en tres fases distintas el proceso de discriminación del ruido producido por los aviones:

- Detección de eventos: normalmente se realiza sobre los registros de medida en base a superación de umbrales.
- Clasificación de eventos: en función de la duración y la pendiente de los eventos se clasifican como probables aviones.
- Identificación de aviones: Se utilizan otros tipos de datos no acústicos (como el seguimiento radar de los aviones, las grabaciones, notas de campo de técnicos...) para verificar que el evento puede ser identificado como producido por un avión.

La siguiente figura ilustra el proceso seguido por los sistemas de monitorado de ruido para la discriminación (marcado) de los eventos sonoros producidos por los aviones.

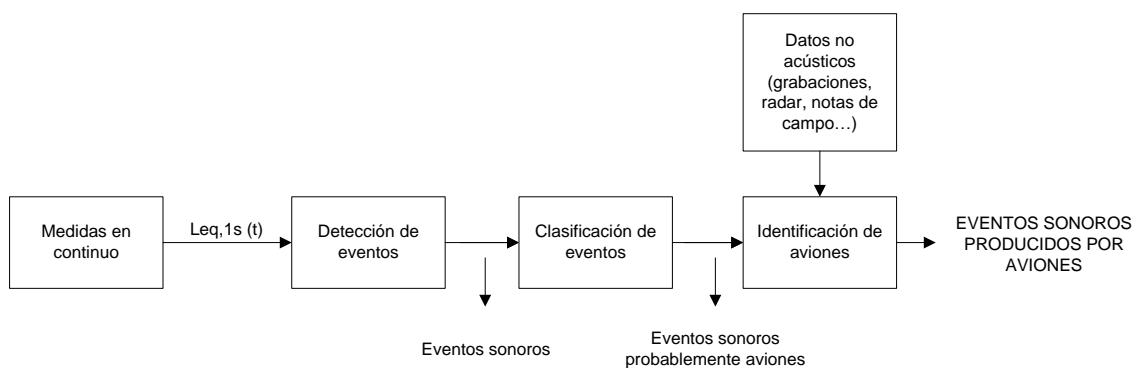


Figura 11. Discriminación de los eventos sonoros de aviones según la ISO 20906

Ante la imposibilidad de discriminar el ruido específico directamente, en el caso de los aviones se opta por partir de un registro continuo de medidas de corta duración. Sobre dicha evolución temporal, se detectan los incrementos de nivel asociados con eventos sonoros. Una vez se obtiene una lista de eventos sonoros detectados, algunos factores como la duración o la pendiente de los sucesos permiten realizar una primera clasificación, que excluirá muchos eventos que no han sido producidos por aviones. Por último, con la ayuda de grabaciones, notas de campo, o del seguimiento radar de los aviones, resulta posible identificar y medir aquellos eventos sonoros que realmente han sido producidos por lo aviones.

Tanto si se utiliza esta, como otra sistemática para la discriminación de los aviones, al final del proceso se obtiene un listado de eventos sonoros con sus instantes de inicio y finalización, que permiten obtener indicadores de ruido (por ejemplo, nivel de exposición sonora), para cada uno de los eventos discriminados.

En este apartado se realiza un estudio de las estaciones de monitorado de ruido que existen en el mercado para analizar los algoritmos que utilizan para la discriminación de fuentes de ruido, y, en la medida de lo posible estudiar las tasas de error que se obtienen.

Tomando como punto de partida la revisión efectuada por (David M. Jones et al. 2007) se ha analizado el método de detección de eventos sonoros empleado por los monitores de ruido de las marcas Brüel & Kjaer, Larson Davis, Norsonic, 01dB, Lochard, Cirrus y Rion. Todos ellos utilizan el marcado de eventos mediante umbrales. Dichos umbrales relacionan nivel sonoro y

1. INTRODUCCIÓN

tiempo, de forma que se efectúa el marcado de sucesos sonoros cuando el nivel sonoro $L(t)$ supera un valor determinado durante un determinado intervalo.

Algunos de estos monitores ofrecen además la posibilidad de definir umbrales diferentes para distintos períodos de evaluación (día, tarde y noche), o incluso por horarios.

En lo que se refiere a la clasificación, algunos sistemas incluyen algoritmos de nivel básico para la evaluación de la pendiente de los eventos, que permite una discriminación grosera de eventos.

En lo referente a la identificación de los eventos según la fuente sonora que los origina, sólo la marca Lochard lo incluía como una más de las características de su equipo EMU2. No se han encontrado evidencias acerca de la implantación real del sistema, su modo de funcionamiento, tasas de error,... Además, en 2009 esta empresa fue adquirida por Brüel & Kjaer. El sistema ANOMS no incluye ninguna referencia a este tipo de características.

Dejando al margen los sistemas de monitorado de ruido existentes en el mercado, se han realizado múltiples intentos para abordar el problema.

A mediados de la década de los 90, el proyecto *MADRAS* (Methods for automatic detection and recognition of acoustic sources (Dufournet et al. 1997a, Dufournet et al. 1997b)), financiado por la Unión Europea, tenía como objetivo el desarrollo de una nueva generación de instrumentos que pudieran automáticamente cuantificar e identificar, en tiempo real, algunas de las principales fuentes sonoras existentes en el medio ambiente. La empresa 01dB, participó en el proyecto y se desarrollaron algoritmos basados en el analizador sonoro Symphonie. El mecanismo básico de detección se basa en el análisis de la evolución temporal del nivel sonoro, principalmente nivel sonoro equivalente ponderado A, y finalmente permite comparar el espectro de los eventos sonoros con una base de datos de diversas fuentes para realizar la identificación. Este asistente inteligente para el reconocimiento de ruido nunca fue comercializado. Algunos resultados fueron publicados por (Dufournet et al. 1997a, Dufournet et al. 1997b) (Dufournet et al. 1997a, Dufournet et al. 1997b)

En esas fechas, el Laboratorio de Acústica de la Universidad Politécnica de Mons publicó sus resultados en el campo de identificación y clasificación de fuentes de ruido ambiental (Couvreur et al. 1998) (Couvreur et al. 1998). El objetivo es aplicar las técnicas utilizadas en el reconocimiento automático de habla, para la identificación de fuentes sonoras. Mediante la utilización de modelos ocultos de Markov se realiza un reconocimiento dinámico de los eventos sonoros y se realiza una identificación de cada evento como perteneciente a una de las siguientes clases: coches, aviones, camiones, trenes y ciclomotores. Los datos utilizados, tanto en la fase de entrenamiento como en la de reconocimiento, no son muy extensos por lo que se considera necesario mejorar este aspecto. Este sistema es un estupendo punto de partida, pero no tiene en consideración diferentes aspectos como el ruido de fondo, la ausencia de los eventos clasificados en el registro sonoro evaluado, superposición de eventos,... Además, el sistema trabaja sobre ficheros de audio previamente detectados.

1. INTRODUCCIÓN

Varios años después, el tema es nuevamente retomado por uno de los autores del proyecto anterior, que presenta una ponencia describiendo un sistema automático de reconocimiento de ruido en entornos urbanos (Couvreur et al. 2004) en colaboración con la empresa 01dB. Este sistema se basa en redes neuronales artificiales y modelos ocultos de Markov para el reconocimiento de eventos sonoros. Cada una de las casi 1000 grabaciones empleadas, contiene un único evento sonoro registrado y claramente detectable sobre el ruido de fondo. Cada grabación fue identificada como ruido de paso de una scooter, o ruido de una bocina. Las tasas de reconocimiento llegan a alcanzar el 95%. En este caso, no se tiene en cuenta el efecto del ruido de fondo, y además todos los eventos sonoros utilizados para testear el sistema pertenecen a una de las clases evaluadas, con lo que no puede comprobarse la eficacia del sistema en una situación real en la que pueden existir eventos sonoros de muy distinta naturaleza.

Otra aproximación diferente a la hora de abordar el problema de identificación de ruido de aviones, fue expuesta en por la empresa Peutz (Van der Heigden et al. 2001)(Van der Heigden et al. 2001). En este caso, la detección de los eventos sonoros se realiza en función de un umbral y una duración sobre una evolución temporal de L_{eq1s} . Se imponen algunos requisitos en base al conocimiento previo del registro de nivel sonoro dejado por las aeronaves (clasificación), y se relaciona la secuencia de eventos con los datos aportados por el sistema de seguimiento radar existente en el aeropuerto Schipol (identificación).

Encontramos otra aportación relevante en 2004, de la Escuela Nacional de Ingenieros de Túnez, y del Instituto Nacional de Ciencias Aplicadas y Tecnología (Rabaoui et al. 2004)(Rabaoui et al. 2004). En este artículo se muestran distintas alternativas utilizadas para la extracción de características de la señal audio. Se trabaja con Modelos Ocultos de Markov, y se realizan diferentes pruebas sobre la optimización de los modelos, el número de capas ocultas, los parámetros empleados, los métodos de codificación. En este caso, la base de datos utilizada en las fases de entrenamiento e identificación son reducidas.

En *Internoise 2004*, existe otra ponencia encaminada a la medición e identificación del ruido de aviones, presentada por del Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad de Groningen y la empresa holandesa Sound Intelligence. Esta propuesta (Andringa et al. 2004) analiza el cocleograma de un evento sonoro y realiza un filtrado tomando como base la dinámica temporal del ruido de aviones. Se descartan los tramos del cocleograma que no cumplan con una subida más rápida que 6 dB cada 50 mseg (clasificación). Con la señal resultante se evalúa el espectro promedio del evento sonoro y se coteja con un espectro de referencia (identificación). Se considera que el entrenamiento del sistema está excesivamente relacionado con la localización específica donde se realizarán las mediciones. Tanto la dinámica producida por un sobrevuelo, como el espectro promedio pueden verse muy alterados por factores tales como las condiciones de temperatura, humedad relativa, trayectorias de vuelo,...

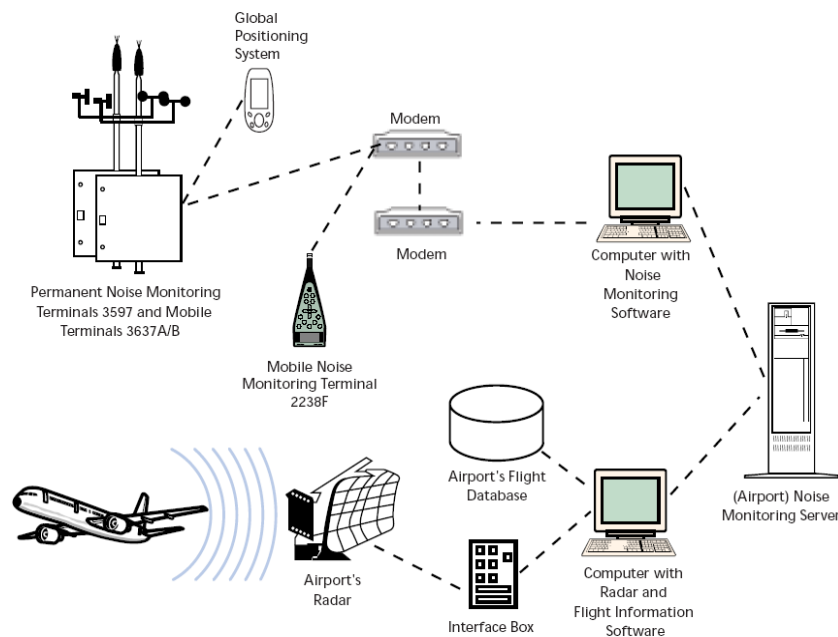
En (Fujii et al. 2004) se propone un método que utiliza un ordenador personal al que se conectan dos micrófonos espaciados 20 cm a través de la tarjeta de sonido. Se calculan la función de correlación y la función de correlación interaural cruzada para determinar el nivel de presión producido por un evento sonoro. La detección de un evento sonoro se define en base a

1. INTRODUCCIÓN

un umbral de nivel sonoro. La identificación y la clasificación se realizan para el máximo del nivel de presión sonora. La clasificación del evento sonoro se efectúa en base a un algoritmo de “template matching”, lo que únicamente ofrece resultados razonables para ruidos estacionarios. No se ofrecen resultados referentes a la tasa de acierto.

La Universidad de Griffith (Cowling 2004, Cowling et al. 2003), realiza un estudio de las principales técnicas existentes para el reconocimiento de tipos de ruidos. Centra el estudio en la detección de eventos sonoros que puedan alertar a un sistema de alarma, y ofrece resultados con un 70% de acierto en el reconocimiento de las diferentes clases establecidas.

Dando un nuevo enfoque al problema, la empresa Era perteneciente al sector aeronáutico, ofrece un sistema de gestión aeroportuaria que incluye estaciones de monitorado de ruido que realizan un seguimiento de los vuelos de los aviones mediante radar. Este sistema ofrece la posibilidad de integrar monitores de ruido de las marcas Brüel & Kjaer, Norsonic y Larson Davis, entre otros. En la siguiente figura (Brüel & Kjaer) se muestra el esquema básico de estas soluciones basadas en la integración con el radar del aeropuerto.



1. INTRODUCCIÓN

Figura 12. Esquema de un sistema de monitoreo de ruido integrado en un aeropuerto

La figura (Brüel & Kjaer) representa el sistema de medida consistente en una serie de monitores de ruido o sonómetros portátiles que efectúan la toma de datos acústicos y la envían a un servidor. Por otra parte gracias a un seguimiento radar de los aviones se puede establecer una radio de cercanía de los aviones a los terminales de monitoreo. En el servidor se establece un enlace entre el seguimiento radar y los eventos sonoros detectados y clasificados, con lo que se completa el proceso de identificación.

Este último esquema, basado en la utilización del radar, es el que ha presentado un mayor éxito comercial, y ha sido implantado en la mayor parte de los sistemas de monitoreo de ruido de los principales aeropuertos internacionales.

Recientemente, la empresa Rion ha implantado en sus monitores un nuevo sistema multi-micrófono que permite identificar la dirección de procedencia del sonido, facilitando la identificación de la fuente de ruido.

También basado en arrays microfónicos para la detección y eliminación del sonido procedente de otras fuentes distintas de los aviones se publica en 2009 el trabajo realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña(Genesà et al. 2009).

En Internoise 2009 la empresa francesa Orelia presentó su sistema de discriminación de ruido de aviones basado en técnicas de reconocimiento de patrones. El sistema analiza grabaciones de eventos sonoros detectados, identificando los aviones.

Por su parte, también en 2009, la Universidad Politécnica de Madrid presenta los resultados del proyecto Hesiodo(Asensio et al. 2010). Aunque este sistema también puede ser utilizado para la identificación de eventos previamente detectados, su principal ventaja es que permite realizar de manera simultánea las tareas de detección, clasificación e identificación. El sistema determina en tiempo real el grado de parecido entre la señal de entrada y el ruido que producen los aviones. Es sobre esta nueva señal sobre la que se realiza la discriminación mediante umbrales. De esta manera los momentos de inicio y final del suceso sonoro se identifican a partir del nivel de semejanza de la señal de entrada, haciendo el sistema más inmune al ruido de fondo.

Otras referencias relacionadas son:(Adams 2004a, Chiang et al. 1993, Zelnio 2009, Adams 2004b).

1. INTRODUCCIÓN

1.2 INCERTIDUMBRE EN EL MONITORADO DE RUIDO DE AVIONES

En todo proceso de medición, el valor observado que se asigna a la medida probablemente diferirá del “valor verdadero” de la magnitud evaluada debido a múltiples factores (precisión del instrumento de medida, estabilidad de la muestra,...). En realidad, lo que denominamos “valor verdadero” corresponde a un concepto teórico, e inaccesible que, en todo caso por convención, puede ser adoptado como referencia o patrón.

El proceso de medición precisamente tiene por objetivo realizar una estimación de dicho valor verdadero, y a la vez realizar una estimación (tampoco certeza) del error cometido, que se corresponde con la incertidumbre de la medida.

Así por ejemplo, cuando se mide el nivel sonoro ocasionado por las aeronaves en una localización determinada, dicha medición llevará asociada una incertidumbre provocada por aspectos tales como la precisión y estabilidad de los instrumentos de medida, o el grado de contaminación de dicha media por culpa del ruido de fondo.

En este apartado se presentan las bases del cálculo de incertidumbre asociado al monitorado de ruido en aeropuertos, tal cual se describe en la norma ISO 20906:2009.

Inicialmente se define el modelo de incertidumbre correspondiente al nivel de exposición sonora provocado cada uno de las aeronaves de forma individual:

$$L_{E,A,i} = L_{E,A,i,meas} + \delta_{slm} + \delta_{residual} \quad \text{Ec 1}$$

donde,

- $L_{E,A,i}$ es el valor verdadero del nivel de exposición sonora provocado por la aeronave i (desconocido)
- $L_{E,A,i,meas}$ es el valor del nivel de exposición sonora indicado por el monitor de ruido para la aeronave i
- δ_{slm} es una componente de error asociada a la incertidumbre propia del instrumento de medida
- $\delta_{residual}$ es una componente de error asociada a la incertidumbre provocada por el ruido de fondo

En el caso de que se evaluara otro indicador distinto asociado a un evento sonoro (p. ejemplo L_{max}), se obtendría una expresión similar.

Para realizar el cálculo de la incertidumbre de la medida, es necesario asociar una función de distribución de probabilidad a los términos δ de la ecuación 1. La esperanza de dicha distribución se corresponderá con la mejor estimación de la entrada, mientras que la desviación estándar da la medida de la dispersión de las observaciones, o sea, de la incertidumbre.

El término correspondiente a la contribución del instrumento de medida a la incertidumbre, puede descomponerse a su vez en otros componentes, como se indica en la ecuación 2.

$$L_{E,A,i} = \delta_{mic} + \delta_A + \delta_{lin} + \delta_V + \delta_p + \delta_T + \delta_{RH} + \delta_{calref} + \delta_{calop} \quad \text{Ec 2}$$

donde,

1. INTRODUCCIÓN

- δ_{mic} es un término que incluye las influencias de la respuesta direccional del micrófono, preamplificador, pantalla antiviento y cualquier otro accesorio relevante
- δ_A tiene en cuenta las tolerancias de la red de ponderación A
- δ_{lin} incluye las tolerancias referentes a la linealidad del medidor
- δ_V es un término que permite incluir la influencia de que tendría la fluctuación de la tensión de alimentación
- δ_p considera la influencia que tienen las variaciones en la presión atmosférica
- δ_T es un término para incluir la influencia de las variaciones de temperatura
- δ_{RH} incluye la influencia de las variaciones de humedad
- δ_{calref} tiene en cuenta las tolerancias de la cavidad del calibrador bajo las condiciones de referencia
- δ_{calop} es un término que considera las tolerancias de la cavidad del calibrador utilizado en condiciones operativas

Para la estimación de las incertidumbres estandar respecto a la ecuación 2, se toman como referencia las tolerancias especificadas normas de diseño y fabricación de los instrumentos de medida (IEC 61672-1 para los sonómetros de Clase 1, IEC 60942 para los calibradores sonoros de clase 1), así como las condiciones límite de funcionamiento del equipo. De esta manera se lleva a una estimación de la incertidumbre estandar provocada por el instrumento de medida:

$$u_{slm} = 0,86 \text{ dB} \quad \text{para } \theta \leq 90^\circ \quad \text{Ec 3}$$

$$u_{slm} = 0,74 \text{ dB} \quad \text{para } \theta \leq 30^\circ \quad \text{Ec 4}$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del sonido, con respecto a la vertical dado que los monitores de ruido habitualmente apuntan el micrófono en esta dirección (figura 13).

Tras la evaluación de la componente de incertidumbre provocada por el instrumento, a continuación trataremos la aportación a la incertidumbre del ruido residual.

El ruido residual presente durante el paso de avión contamina la medición (ruido de fondo) y produce un incremento (ΔL_p) del nivel reportado con respecto a una hipotética medida en ausencia de ruido de fondo.

$$\Delta L_p = -10 \log \left[1 - 10^{-0.1(L_{p,meas} - L_{p,residual})} \right] \quad \text{dB} \quad \text{Ec 5}$$

Para minimizar la, la norma se limita a recomendar que las localizaciones de medida se seleccionen de tal manera que el efecto del ruido de fondo sea despreciable con respecto al ruido que provocan los aviones. Concretamente recomienda colocar los monitores de ruido en localizaciones donde el evento sonoro produzca niveles sonoros máximos al menos 15 dB mayores que el nivel de exposición sonora correspondiente al sonido residual promedio. La figura 14, tomada de la norma ISO 20906, pretende aclarar estos conceptos¹.

¹ A lo largo del trabajo se establecerá una diferencia entre los conceptos de ruido de fondo y ruido residual, como se explica en los anexos.

1. INTRODUCCIÓN

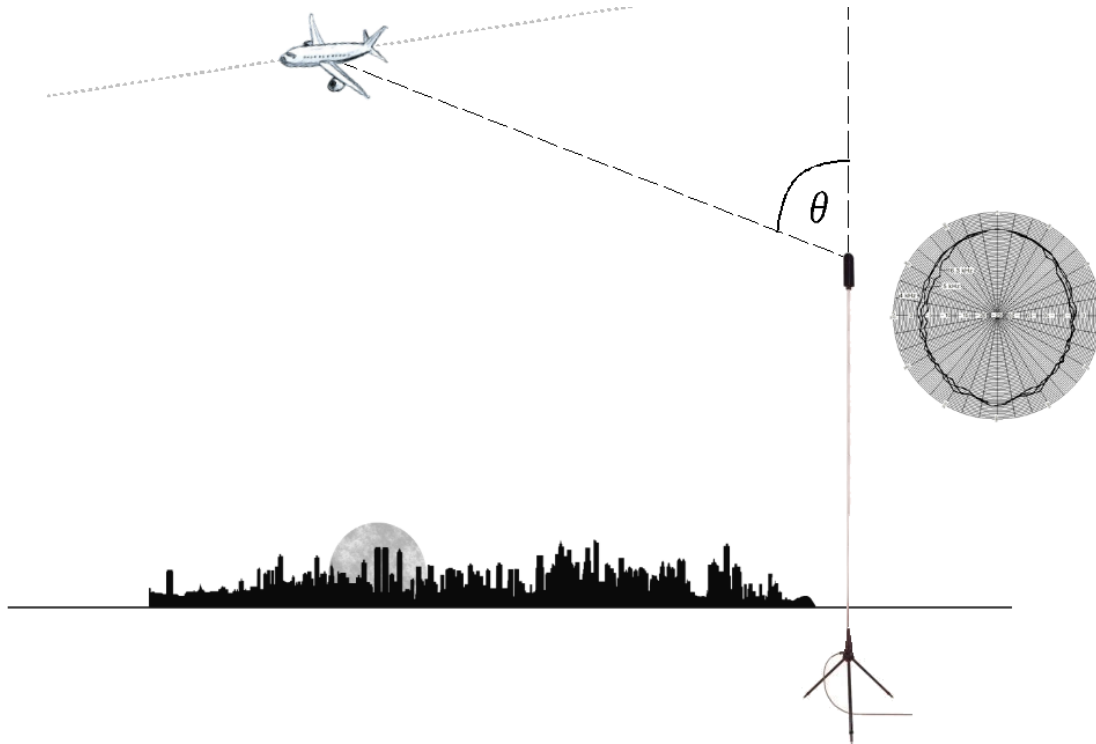


Figura 13. Efecto del ángulo de incidencia del sonido

Dado que el patrón de directividad del micrófono sufre fluctuaciones, la medida se verá afectada por la posición relativa entre el avión y el micrófono, lo que implica una causa de incertidumbre.

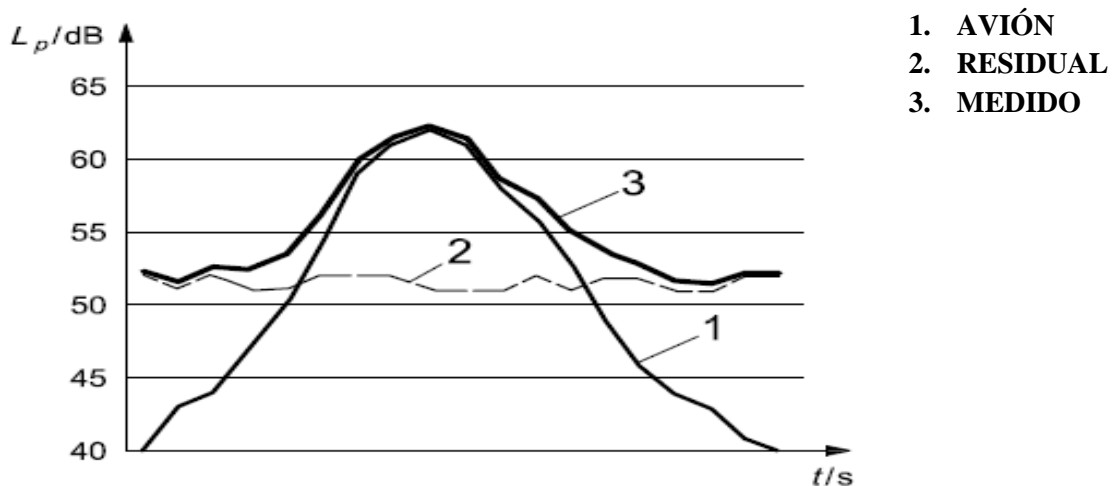


Figura 14. Efecto del ruido residual sobre la medida

La medición efectuada por un monitor de ruido suma las aportaciones sonoras del avión y el resto de fuentes sonoras. A medida que el avión se acerca, el sonido que este emite se eleva notablemente, por lo que la aportación del ruido residual se minimiza. Sin embargo, dado que el nivel de exposición sonora (indicador utilizado) integra la energía entre los instantes de inicio y final del evento, dicho indicador estará afectado por el ruido de fondo.

1. INTRODUCCIÓN

En el caso de evaluar el conjunto de eventos sonoros ocurridos durante el tiempo de medida deberán tenerse en cuenta las incertidumbres descritas respecto a los eventos aislados, y además se incluirán otras derivadas del post-procesado (promediado sobre ciertas rutas, de determinados tipos de aviones...). Además aparecerá incertidumbre asociada a los sistemas de discriminación de ruido de aviones (aviones no detectados, aviones mal clasificados, otros eventos clasificados como aviones). Este punto es tratado vagamente en la norma, y es precisamente donde se focaliza este trabajo fin de máster: la incertidumbre que aportan las técnicas de detección, clasificación e identificación.

Incluso en el caso de que se utilice un monitor en continuo, pueden darse circunstancias que imposibiliten la medición de la totalidad del período que se pretende evaluar. Cuando se produce esta circunstancia aparecen nuevos factores que aportan incertidumbre a la determinación efectuada. Dichos factores tienen que ver con la fuente sonora (tipos de aviones, usos de pistas, dispersión de trayectorias...), con la propagación del sonido (dirección e intensidad del viento, inversión térmica...), con la posición cambiante del avión en relación con las condiciones de propagación,... Puede obtenerse más información referente a estas contribuciones a la incertidumbre en la propia norma, no siendo incluida dicha descripción en este documento por quedar claramente al margen de los objetivos del estudio.

1. INTRODUCCIÓN

1.3 OBJETIVOS

En los apartados anteriores se han descrito los fundamentos de la evaluación del ruido de aeropuertos, y se ha puesto de manifiesto la importancia que adquieren dentro de esta evaluación las tareas de discriminación de fuentes sonoras.

También se han descrito los principales procedimientos de medida y técnicas existentes para llevar a cabo dicha discriminación a partir de la evolución temporal del nivel sonoro registrado en intervalos de un segundo. Las tareas de discriminación (o marcado) consisten en la detección de los eventos sonoros, para una posterior clasificación e identificación de los mismos como producidos por aviones.

Como se ha mencionado, existe una componente de incertidumbre asociada directamente a los procesos de discriminación del ruido de las aeronaves. Evidentemente, las tasas de fallo o acierto de los sistemas de clasificación e identificación afectarán a los resultados reportados, convirtiéndose en una contribución a su incertidumbre. Este aspecto es tratado de manera superficial en la ISO 20906 y queda fuera del alcance de este trabajo.

Al margen de esta contribución, derivado del proceso de detección de los eventos sonoros surge otra contribución a la incertidumbre, que es precisamente donde se concentran los esfuerzos de este trabajo fin de máster. La incertidumbre asociada a la detección de los sistemas de marcado empleados, manuales u automáticos, así como de aspectos tales como el ruido residual, el rango dinámico de los eventos sonoros, o el factor humano. Con el objetivo final de cuantificar dicha componente de incertidumbre, se ha diseñado un experimento, que a modo de ejercicio de intercomparación entre laboratorios, pretende dar respuestas a dos cuestiones básicas:

- Definir cuáles son los factores que influyen en la incertidumbre de detección
- Cuantificar dicha incertidumbre de detección

En el apartado 2.1 se describe la metodología aplicada, por una parte para el diseño del experimento (que sienta las bases de intercomparaciones online: e-comparisons), y por otra al tratamiento de datos.

La cuantificación de esta componente de incertidumbre permitirá su valoración con relación al resto de componentes que afectan al monitorado de ruido de aviones (principalmente, instrumentación de medida y ruido residual). Esta estimación permitirá evaluar la necesidad de incluir elementos de ayuda a la detección (técnico de medida, sistema radar, sistema de reconocimiento de patrones...), en función del nivel de calidad exigible a las mediciones y del coste asociado. Así mismo, los resultados reportados por los participantes en el experimento servirán de referencia para evaluar el rendimiento de sistemas de detección e identificación automáticos en diferentes entornos de trabajo.

Así pues, los objetivos planteados en este trabajo fin de máster consisten en definir las contribuciones a la incertidumbre derivadas del proceso de discriminación de eventos sonoros, establecer una metodología que permita efectuar su estimación, y aplicarla a casos concretos.

2 METODOLOGÍA

2.1 DETECCIÓN COMO MOTIVO DE INCERTIDUMBRE

Cualquiera que sea la sistemática empleada en la discriminación del ruido producido por los aviones, al final del proceso se obtiene un listado de eventos sonoros con sus instantes de inicio y finalización, que permiten obtener indicadores de ruido (por ejemplo, nivel de exposición sonora), para cada uno de los eventos discriminados.

Como se ha comentado, las tasas de fallo y acierto tendrán un efecto sobre los resultados de la medida, que se han descrito como localizados en las fases de clasificación e identificación. Sin embargo, aún en el caso de que el sistema de discriminación fuera capaz de identificar correctamente todos y cada uno de los eventos sonoros detectados, existirían otros motivos de incertidumbre en la medida también relacionados con el proceso de discriminación de los aviones desde la primera fase de detección.

Este proceso de discriminación, en definitiva, consiste en definir los instantes de inicio y finalización del suceso sonoro. A medida que el avión se acerca al punto de medida, el nivel sonoro provocado por este se incrementa, de manera que en un determinado instante supera el nivel del ruido de fondo. Pero como el nivel de ruido de fondo también fluctúa, resulta sumamente complicado determinar de manera inequívoca el momento de inicio del evento sonoro. Tanto en el momento de inicio del suceso sonoro como en el de finalización del mismo el sonido de fondo y el sonido del avión se escuchan simultáneamente, y las fluctuaciones de ambos dificultan notablemente la tarea del técnico en un proceso de procesamiento manual de los registros sonoros (ver figura 15).

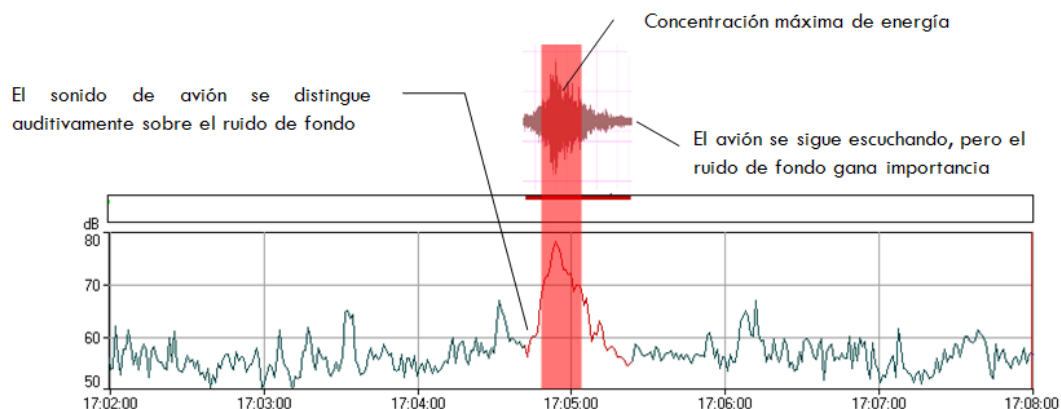


Figura 15. Instantes de inicio y final del suceso sonoro

Tanto en los procesos manuales como en los automáticos, resulta complicado determinar de manera exacta los momentos de inicio y final del evento sonoro. Al utilizar la gráfica de las mediciones, la evolución temporal del ruido residual puede dificultar la localización exacta del evento. Si se utiliza ayuda de grabaciones, tanto al inicio como al final del evento el sonido del avión se solapa con el ruido residual, ya que ambos se escuchan simultáneamente.

Esta problemática también existe cuando se emplea un sistema de medida automático y desatendido.

2. METODOLOGÍA

Tanto en el caso de mediciones atendidas, como en el caso de mediciones desatendidas, la incertidumbre existente con respecto a la configuración de los umbrales y la colocación de los instantes de inicio y finalización de las medidas tendrá un reflejo en la incertidumbre de la medida, tanto en cada uno de los eventos, como la medida del ambiente sonoro global.

A su vez, estos factores vendrán influidos por otros primarios, como por ejemplo el nivel de preparación y experiencia de los técnicos, o el ambiente sonoro.

2.1.1 Diseño del experimento

Con el objetivo de encontrar cuales son los principales factores de incertidumbre relacionados con el proceso de detección de ruido de aviones, se diseñó un experimento tomando como punto de partida las bases de un ejercicio de intercomparación entre laboratorios. Los resultados permitirían evaluar y cuantificar la influencia que tiene el procesado de los datos sobre los resultados que se reportan en un informe de medida de ruido de aviones, estando presente fundamentalmente esta influencia en las tareas de detección, clasificación y detección. La siguiente tabla resume los principales factores de influencia que han sido investigados en este proyecto:

Tabla 2. Factores de influencia

Factor	Influencia
Entorno acústico	El entorno acústico puede tener una influencia sobre la discriminación de los sucesos sonoros, ocultándolos parcial o totalmente, tanto en lo referido a nivel como en lo referido a frecuencia.
Marcado manual / automático	La utilización de procedimientos de marcado automáticos puede implicar diferencias en comparación con un marcado manual.
Parámetros de la detección automática: umbral, duración, pre-disparo, post-disparo	La selección de los parámetros de detección puede afectar a los resultados.
Notas de campo / radar frente a grabaciones audio	La utilización o no de elementos de ayuda al marcado, así como los tipos de ayuda utilizados (radar, notas de campo, grabaciones) pueden afectar a los resultados.
Institución	La manera en que las diferencias culturales pueden influenciar los enfoques realizados por instituciones nominalmente equivalentes a la hora de interpretar un fenómeno, así como un documento normativo.
Experiencia de los técnicos	La experiencia, así como el nivel de formación técnica y/o científica puede tener una influencia en la interpretación del fenómeno.

2. METODOLOGÍA

El experimento se diseñó siguiendo las características fundamentales de una intercomparación entre laboratorios según se describe en la ISO/IEC Guide 43-1 (ISO 1997). Tal y como se indica en esta norma, dichos ejercicios de intercomparación pueden resolver algunos de los principales problemas que surgen en esta investigación:

- Determinar el comportamiento de laboratorios individuales en ensayos específicos o medidas, así como realizar un seguimiento del laboratorio.
- Establecer la efectividad y comparabilidad de nuevos métodos de ensayo o medida y monitorizar los métodos establecidos.
- Identificar diferencias entre laboratorios
- Determinar las características del comportamiento de un método.
- Asignar valores de referencia a materiales y evaluar su aplicabilidad para el uso en determinados procedimientos de ensayo o de medida.

Se ha aplicado un esquema de proceso parcial (partial process scheme) para elaborar ejercicios de transformación de datos en los que se facilitó a los laboratorios un conjunto de datos y se les requirió para que reportaran resultados elaborados sobre ellos. En este ejercicio de intercomparación el autor de este trabajo fin de máster realizó las funciones asignadas al coordinador de la intercomparación.

En los siguientes apartados se realiza una descripción detallada de los materiales de referencia, del proceso de preparación de los objetos de ensayo y el resto de aspectos relacionados con este experimento.

2.1.1.1 Los participantes

El coordinador de la intercomparación fue el encargado del diseño del experimento, mientras que el resto de los participantes no fueron informados de los pormenores del mismo hasta que no proporcionaron sus propios resultados de manera independiente y no condicionada.

Cada participante rellenó un formulario con información referente a su formación y experiencia en el campo de la acústica, las mediciones de ruido ambiental y el monitorado de ruido aeroportuario. De acuerdo con esta información, cada participante fue clasificado según tres grado de experiencia. La clase A se corresponde con aquellos participantes sin experiencia en mediciones de ruido ambiental. La clase B se corresponde con aquellos participantes que reportaron una cierta experiencia en mediciones de ruido ambiental, mientras que la clase C fue asignada a aquellos participantes con una gran experiencia en monitorado de ruido ambiental.

Gracias a los contactos europeos del Grupo de Investigación en Instrumentación y Acústica Aplicada de la Universidad Politécnica de Madrid se consiguió la implicación de otras cuatro universidades. Por lo tanto, la intercomparación contó con participantes procedentes de las siguientes instituciones:

- Politécnico de Milán (Italia)
- Universidad Politécnica de Madrid (España)
- Universidad de Zagreb (Croacia)
- Universidad Politécnica de Cataluña (España)
- Universidad de Sheffield (Reino Unido)

2. METODOLOGÍA

Con el objetivo de mantener el anonimato a lo largo del proceso, así como en lo referente a la publicación de los resultados, se asignó a cada una de las instituciones un identificador que no era conocido más que por el coordinador. De manera similar se actuó con cada uno de los participantes individuales.

La siguiente tabla muestra de manera resumida la información referente a las instituciones y los participantes que intervinieron en el ejercicio.

Tabla 3. Participantes e instituciones

Institución	Participantes		
	Clase A	Clase B	Clase C
1	9	4	3
2	38	3	2
3	1	0	1
4	0	0	1
5	0	0	1
Total	48	7	7

2.1.1.2 La localización de las mediciones

Para la realización del experimento se seleccionaron tres entornos de ruido diferentes en las proximidades del aeropuerto de Madrid-Barajas, conforme a la siguiente descripción:

- Un primer entorno en el que los sucesos sonoros producidos por los aviones fueran fácilmente detectables, y en ausencia de eventos producidos por otras fuentes sonoras.
- Un segundo entorno acústico en el que los eventos sonoros producidos por los aviones en los ficheros de medida era difíciles de detectar, aun siendo claramente audibles
- El último consistió en un entorno acústico en el que los sucesos sonoros producidos por los aviones eran sumamente difíciles de detectar, existiendo incluso eventos sonoros producidos por otros tipos de fuentes de ruido.

Las mediciones y las grabaciones sonoras fueron seleccionadas entre un conjunto que previamente había sido adquirido en proyectos llevados a cabo por la UPM. En todos los casos la toma de datos se efectuó en campo abierto, lejos de superficies reflectantes (salvo el suelo), con el micrófono ubicado sobre un mástil a cuatro metros sobre el suelo, y cumpliendo los requisitos de las normas de medición aplicables (ISO 1996 e ISO 20906).

2. METODOLOGÍA

En la Tabla 5 se describen las localizaciones utilizadas en el experimento:

Tabla 4. Descripción de las localizaciones de medida

Localización	Descripción
MEJ	Esta localización se encuentra ubicada en la población de Mejorada del Campo, en Madrid, a una distancia aproximada del aeropuerto de 12 km en dirección sureste. El ruido residual está producido por ruido de tráfico rodado con un nivel sonoro inferior a los 50 dBA. Los ficheros de medida reflejan múltiples eventos sonoros claramente distinguibles y producidos por aviones.
MOL	El punto ubicado en El Molar (Madrid) está ubicado a una distancia aproximada de 20 km al norte del aeropuerto. En este punto los eventos sonoros producidos por los aviones son más difíciles de detectar en los ficheros de medida.
LOE	Esta localización está ubicada en Loeches (Madrid) a una distancia aproximada de 15 km al sureste del aeropuerto. Dado que dicho punto está alejado de las rutas aéreas, el nivel sonoro producido por los aviones es bastante menor que en MEJ. Los sucesos sonoros más elevados que se detectan en los ficheros de medida no son causados por los aviones.

En las figuras siguientes se muestran los gráficos correspondientes al registro de medida en cada una de las tres localizaciones de medida.

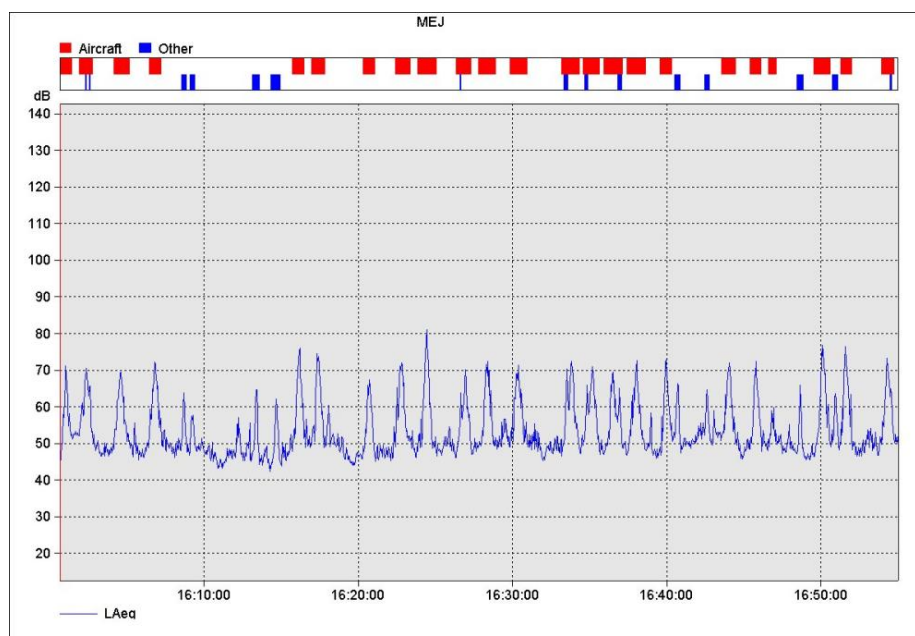


Figura 16. Registro de medida en la localización MEJ

Los principales eventos sonoros registrados en esta localización son producidos por los aviones. Existen otros sucesos sonoros de menor nivel y duración que no supondrán grandes problemas en las tareas relacionadas con el mercado.

2. METODOLOGÍA

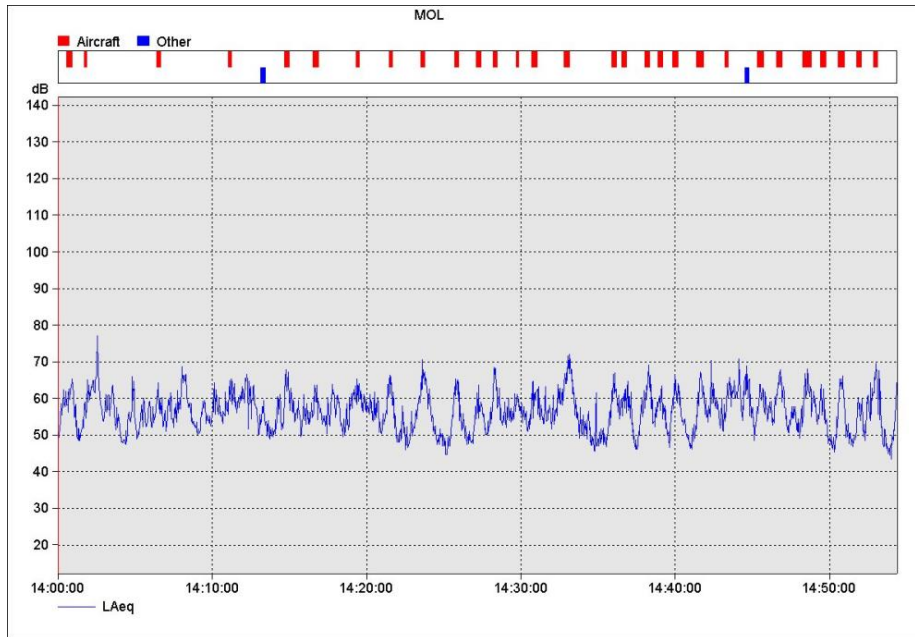


Figura 17. Registro de medida en la localización MOL

El ruido residual hace que los eventos sonoros sean mucho más difíciles de discriminar. La utilización de ayuda al marcado será de gran ayuda para mejorar la calidad de los resultados, reduciendo la tasa de fallos y aciertos.

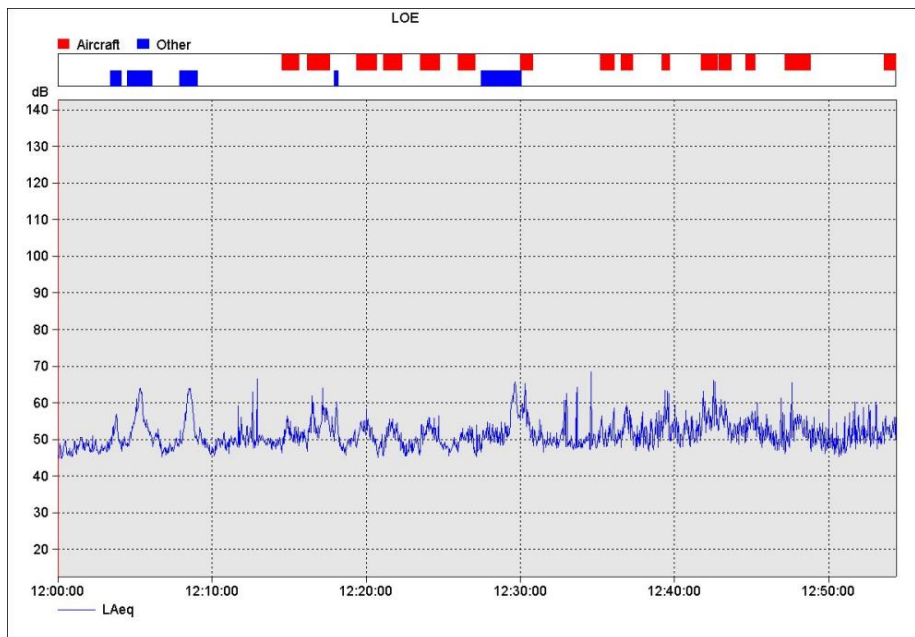


Figura 18. Registro de medida en la localización LOE

En esta localización los aviones tienen un impacto muy reducido. Los principales eventos sonoros registrados se corresponden a otras fuentes sonoras, que serán confundidas con aviones en ausencia de una ayuda al marcado (radar, notas de campo...)²

² Debido a los problemas surgidos durante el procesado y análisis de los resultados, se excluyó del procesado, a posteriori, el intervalo asociado a los eventos sonoros no provocados por aviones

2. METODOLOGÍA

En la figura 19 (obtenida de Google Maps) se puede observar la ubicación aproximada de los puntos de medida con respecto al aeropuerto.

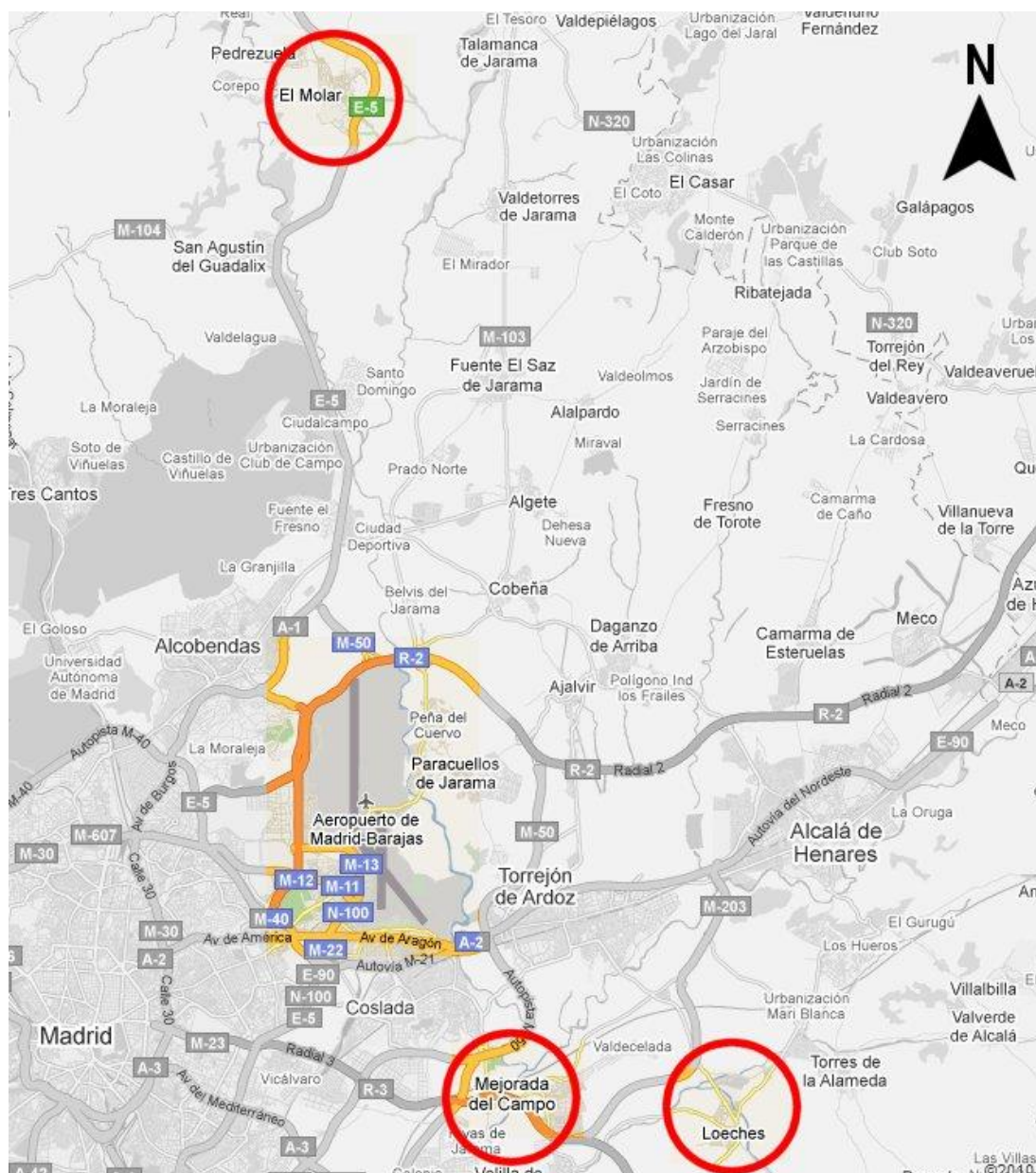


Figura 19. Localización de los puntos de medida.

2.1.1.3 Las mediciones y grabaciones

Las grabaciones y medidas utilizadas en este proyecto fueron cuidadosamente seleccionadas entre más de 200 horas de grabaciones de ruido ambiental correspondientes a diferentes localizaciones en las inmediaciones del aeropuerto de Madrid Barajas a lo largo de 2009.

En función de los diferentes escenarios contemplados, se seleccionaron tres conjuntos de ficheros consistentes en un fichero de medida y la correspondiente grabación sonora, quedando de esta manera seleccionados los puntos de medida.

2. METODOLOGÍA

Para la realización de las mediciones se empleó una unidad de monitorado de ruido portátil, consistente en un sonómetro de la marca Brüel & Kjaer, modelo 2250. A través de su salida de auriculares (salida audio del preamplificador) se grabó la señal de audio con la ayuda de un ordenador portátil.

Con el objetivo de facilitar la labor de los participantes en el experimento, e intentando mantener su atención a lo largo de su realización, se decidió que los ficheros tuvieran una duración inferior a una hora. Por este motivo se seleccionaron todos los ficheros de medida y grabaciones con una duración exacta de 54 minutos y 22 segundos.

Los ficheros de sonido se grabaron en formato mp3 con el programa Adobe Audition(Adobe 2011), mientras que los ficheros de medida fueron suministrados en el formato propio de los sonómetros Brüel & Kjaer, con lo que se facilitaba el uso a los participantes gracias al interfaz del software Evaluator(Brüel & Kjaer 2007).

2.1.1.4 El diseño del experimento

Teniendo en cuenta que el principal objetivo se refiere a obtener información referente a las técnicas de detección clasificación e identificación, se decidió que los tres ficheros, correspondiente a tres diferentes ambientes sonoros, debían ser analizados según tres casos diferentes. De esta manera se pretendía evaluar la importancia de la existencia de una ayuda al marcado en el proceso, así como la influencia que tendría la utilización de diferentes tipos de ayuda. Por lo tanto, tres tipos de ayuda al marcado:

- Ficheros de audio: además de los registros de medida que presentan la evolución temporal del nivel sonoro, se facilitaría a los participantes el fichero de audio correspondiente, de manera que pueda ser utilizado durante el proceso de discriminación de fuentes sonoras.
- Listado de eventos sonoros: en este caso, en lugar de las grabaciones se facilitaría a los participantes un listado de eventos sonoros producidos con la hora en que dichos eventos se producen. Esta información fue obtenida “in situ” por los técnicos que realizaron las mediciones, pero podría haberse producido por otras vías (radar tracking, reconocimiento de patrones). En cualquier caso, la información facilitada no condiciona los instantes de inicio y final del evento sonoro, ni su duración, debiendo ser decididos.
- Sin ayuda: en este caso no se proporcionó ningún otro elemento de ayuda al marcado, por lo que los participantes únicamente dispusieron de los registros de medida.

Asimismo, intentando mejorar la fiabilidad de los resultados, se consideró adecuado utilizar el mismo fichero para el análisis de los tres casos, debidamente modificado para evitar sesgos por parte de los participantes. Por este motivo, sin poner en aviso a los participantes, el mismo fichero fue editado y modificado para que pareciera haber sido grabado en tres localizaciones distintas, en distintos días. También se introdujo un valor de corrección a las medidas (una corrección distinta para cada uno de los indicadores utilizados en el experimento), para que los resultados reportados no fueran demasiado parecidos, y levantar sospechas en los participantes que pudieran alterar el experimento. Con la ayuda de un editor de ficheros binario

2. METODOLOGÍA

(HHD Software 2010), se analizó la estructura interna de los ficheros (formato propio del software Evaluator de Brüel & Kjaer), y mediante un programa en matlab(The Mathworks 2008) se realizó la modificación de los datos.

Por último cada fichero fue dividido en pequeñas partes que fueron juntadas nuevamente en orden diferente (ver figura 20).

Por lo tanto, cada participante tuvo que analizar un total de 9 ficheros de medida, cuyas características principales quedan reflejadas en la siguiente tabla:

Tabla 5. Descripción de los ficheros utilizados

Archivo	Localización	Material suministrado a los participantes			Comentarios
		Ficheros de medida	Listado de aviones	Grabaciones	
9	LOE	X		X	Ficheros de medida originales y grabaciones audio
8	MOL	X		X	Ficheros de medida originales y grabaciones audio
7	MEJ	X		X	Ficheros de medida originales y grabaciones audio
6	LOE	X	X		Variación del archivo 9
5	MOL	X	X		Variación del archivo 8
4	MEJ	X	X		Variación del archivo 7
3	LOE	X			Variación del archivo 9
2	MOL	X			Variación del archivo 8
1	MEJ	X			Variación del archivo 7

Los resultados han sido examinados con un enfoque propio de la acústica ambiental, analizando la variabilidad de los resultados reportados de cada fichero de manera global, lo que implica el análisis del nivel sonoro equivalente reportado para el total del período de evaluación³. La Tabla 6 muestra los resultados que se solicitaron a los participantes por cada uno de los ficheros. Además de los resultados, se requirió el envío de los ficheros de trabajo, con el objetivo inicial de poder asegurar el correcto desempeño de las tareas. Posteriormente, estos ficheros pudieron ser utilizados para solventar algunos de los problemas detectados en el trabajo.

³ Desde el punto de vista de la detección hubiera sido más interesante analizar un resultado por cada uno de los eventos sonoro detectados.

2. METODOLOGÍA

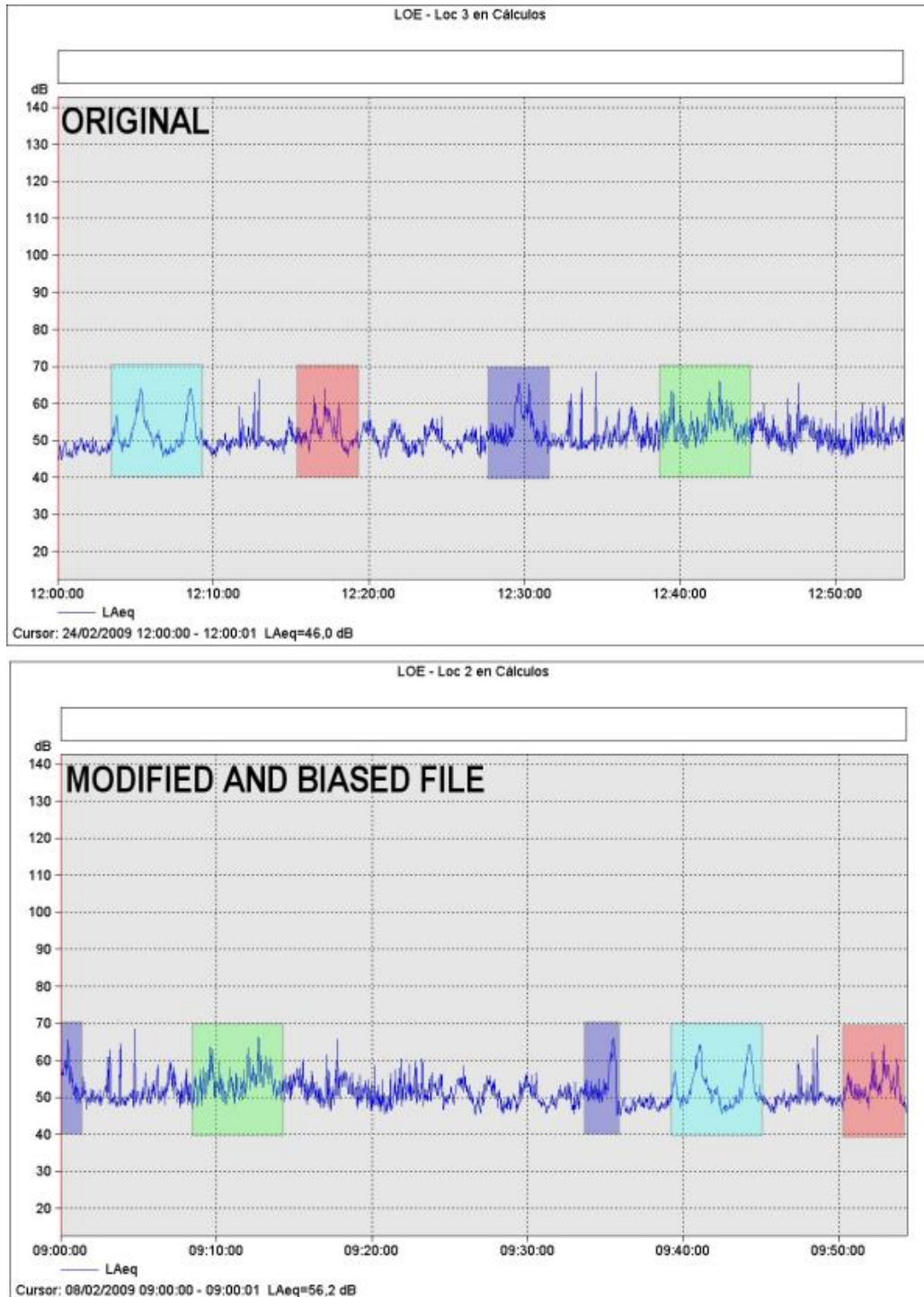


Figura 20. Modificaciones aplicadas sobre los ficheros originales

Para conseguir que los participantes procesaran tres veces los mismos ficheros manteniendo, a su vez, la independencia de los resultados reportados, fue necesario modificar en nivel y apariencia los ficheros originales. Para ello, los ficheros de medida fueron recortados y remezclados convenientemente, manteniendo las debidas precauciones como para que dicha transformación no afectara a las tareas de discriminación, pudiéndose restaurada en el análisis de los resultados. La estructura interna de los ficheros tuvo que ser modificada mediante un programa en matlab.

2. METODOLOGÍA

Tabla 6. Formulario reportado por los participantes

	Full reference period				Duration of aircraft events	
File	D Duration of measurements (s) <i>(Columna A)</i>	L_{eq,D} A- weighted Overall equivalent noise level(dB) <i>(Columna B)</i>	L_{residual,D} A- weighted Residual equivalent noise level(dB) <i>(Columna C)</i>	L_{aircraft,D} A- weighted equivalent noise level, only aircraft (dB) <i>(Columna D)</i>	D_{aircraft} Aircraft events duration (s) <i>(Columna E)</i>	L_{aircraft,Daircraft} A-weighted equivalent noise level, only aircraft (dB) <i>(Columna F)</i>
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Las columnas A - D se refieren al periodo total de referencia, o sea, a la duración total de las medidas. Por su parte, las columnas E y F toman como referencia la duración de los eventos sonoros marcados. A continuación se indica el significado concreto de la información solicitada en cada columna:

- Columna A: Duración de las medidas utilizadas para calcular los resultados. En este caso la duración del período de referencia coincide con la duración de los ficheros suministrados (3262 s), y todos los participantes lo reportaron así.
- Columna B: Nivel equivalente correspondiente al ruido total. Es el dato que facilita el sonómetro independientemente de la acción del técnico, por lo tanto no es posible error alguno (salvo la utilización del indicador equivocado).
- Columna C: Nivel equivalente correspondiente al ruido específico de los aviones, expresado con respecto al intervalo de referencia (en este caso 3262s). Este dato no es facilitado directamente por el software empleado (B&K Evaluator), sino que se calcula a partir del dato de la columna F, que sí proporciona directamente el software. Para evitar errores en la aplicación de conceptos por parte de los estudiantes, este resultado no fue utilizado tal cual lo reportaron los participantes, sino que fue obtenido directamente a partir de los ficheros que estos procesaron.
- Columna D: Nivel equivalente correspondiente al ruido residual, expresado con respecto al intervalo de referencia. Este dato no ha sido utilizado en el experimento.
- Columna E: Duración de las medidas utilizadas para calcular el ruido producido por lo aviones. Esta duración se utiliza como intervalo de referencia para la Columna F.
- Columna F: Nivel equivalente correspondiente al ruido de los aviones, expresado con respecto a la duración de los eventos sonoros detectados (paso de los aviones)

2. METODOLOGÍA

expresado en la Columna E). Una vez que el usuario marca los aviones sobre la gráfica de evolución temporal de la medida, el software calcula este dato de manera automática. Este valor fue el empleado en el experimento para derivar realmente el dato de la columna D, objeto de este informe utilizando la siguiente ecuación:

$$L_{aircraft,D} = L_{aircraft,Daircraft} + 10 \log \frac{D_{aircraft}}{D} \quad \text{Ec 6}$$

Gracias a la herramienta de trabajo colaborativo Microsoft Sharepoint Portal Server(Microsoft 2007), se creó un sitio web en el que el organizador puso a disposición de los participantes la documentación y los archivos necesarios para la realización del experimento.

Los participantes hicieron llegar los resultados del ejercicio vía correo electrónico directamente al organizador, salvo en el caso de los procedentes del Politécnico de Milán que ubicaron todos sus resultados en un sitio ftp, desde el que dichos datos fueron descargados.

2.1.2 Análisis de los factores de influencia

La información suministrada por los participantes fue chequeada y recopilada en una hoja de cálculo que fue procesada y analizada mediante el software de tratamiento estadístico StatGraphics(Statistical Graphics Corp. 2000).

En primer lugar debe tenerse en cuenta que una parte de los datos recopilados contienen información redundante:

- La duración de las medidas (Columna A) y el nivel equivalente del ruido total para el período de referencia completo (Columna B) no dependían de los participantes, salvo en el caso de que estos cometieran errores.
- La duración de los eventos producidos por los aviones (Columna E) y el nivel equivalente referido a esta duración (Columna F) debidamente combinados componen la información requerida en la Columna D ($L_{\text{aircraft,D}}$).

Por lo tanto son los datos existentes en esta última columna D ($L_{\text{aircraft,D}}$) los que fueron analizados en este estudio, ya que permiten valorar la influencia de los diferentes factores de estudio sobre los resultados reportados. A continuación se muestra el gráfico de cajas correspondientes a los datos facilitados por los participantes. En un primer análisis se puede observar un cierto nivel de agrupación en los resultados que proceden de una misma toma de datos (ficheros 1,3 y 7,...), además se observa como la dispersión de los resultados tiene un cierto grado de relación con el ambiente sonoro... En el gráfico de la figura 21 aún no se han excluido valores atípicos, únicamente queda fuera de la gráfica los participantes que no reportaron aviones en el fichero correspondiente⁴.

Para iniciar el análisis de factores y la estimación de los modelos de incertidumbre, se procedió, en este punto a eliminar del análisis de datos todos aquellos valores atípicos observados en los resultados de los participantes.

Posteriormente, dado que los tres entornos acústico presentan diferentes medias debidas a las características acústicas del lugar, se decidió eliminar del análisis dicha influencia restando a los datos reportados por los participantes el valor verdadero correspondiente a cada entorno. El valor verdadero correspondiente a cada uno de los entornos acústicos ha sido estimado a partir de los promedios reportados por los expertos para cada uno de los entornos, cuando utilizaron ayuda al marcado (tanto listado de eventos como grabaciones). La figura 22 presenta el diagrama de cajas correspondiente a estos resultados, mientras que la Tabla 7 muestra los resultados asignados definitivamente al valor verdadero correspondiente a cada entorno.

⁴ Debido a los problemas que se describirán en el de conclusiones fue necesario descartar fragmentos del Entorno 3, lo que ha ocasionado que algunos de los participantes no reportaran aviones en ese fichero.

Gráfico de Caja y Bigotes

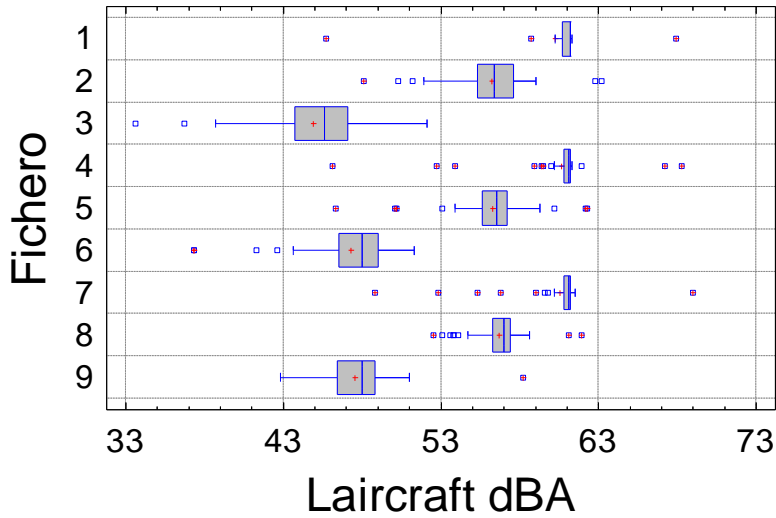


Figura 21. Distribución de las observaciones en función del archivo analizado

El diagrama de cajas muestra los resultados reportados en función del fichero analizado. Dado que los tres archivos originales fueron transformados en nueve ficheros de análisis, se observa un nivel de agrupación en la distribución de los ficheros relacionados (1-4-7 ; 2-5-8 ; 3-6-9).

Gráfico de Caja y Bigotes

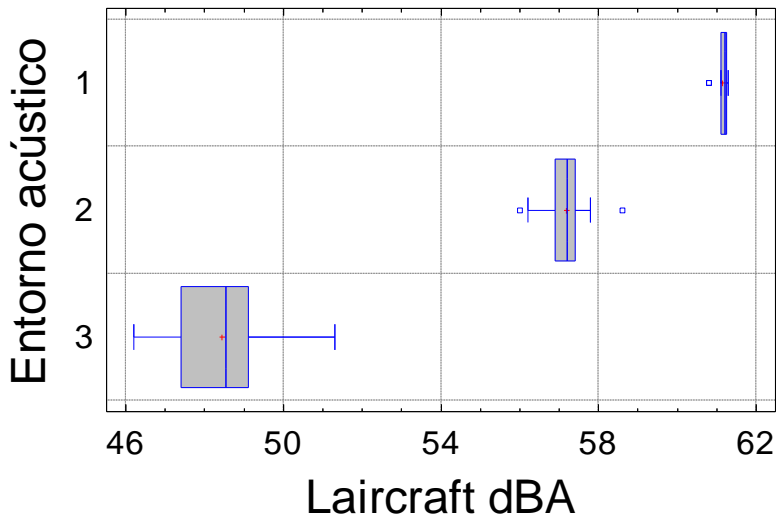


Figura 22. Resultados reportados por los expertos

El valor verdadero de cada entorno acústico se estimó a partir de las observaciones de los expertos, para los casos en que dispusieron ayuda al marcado de los aviones (grabaciones o listado de eventos). Como se puede observar la dificultad creciente del entorno acústico se traduce en un aumento en la dispersión de los resultados, incluso en el caso de los expertos que cuentan con ayuda al marcado.

Tabla 7. Valor verdadero de los entornos acústicos

Entorno acústico	Valor verdadero $L_{aircraft}$ (dBA)
1	61,15
2	57,15
3	47,46

En lo sucesivo, los análisis se realizan en función del error en cada una de las observaciones, con respecto al valor verdadero (TV) estimado. Así el análisis del factor entorno acústico queda independizado del nivel sonoro real existente en la localización, lo que permitirá estudiar únicamente la influencia de este factor en lo que se refiere a la discriminación de los eventos sonoros. La ecuación 7 describe el error:

$$error = L_{aircraft} - TV \quad \text{Ec 7}$$

A continuación se presenta un análisis estadístico descriptivo de la variable error. Al igual que pasaba con la variable $L_{aircraft}$, a pesar de la transformación realizada, la variable error no cumple los criterios de normalidad y homocedasticidad, por lo que no resulta posible aplicar la técnica de Análisis de la Varianza (ANOVA), siendo necesario recurrir a técnicas no paramétricas.

Gráfico de Caja y Bigotes

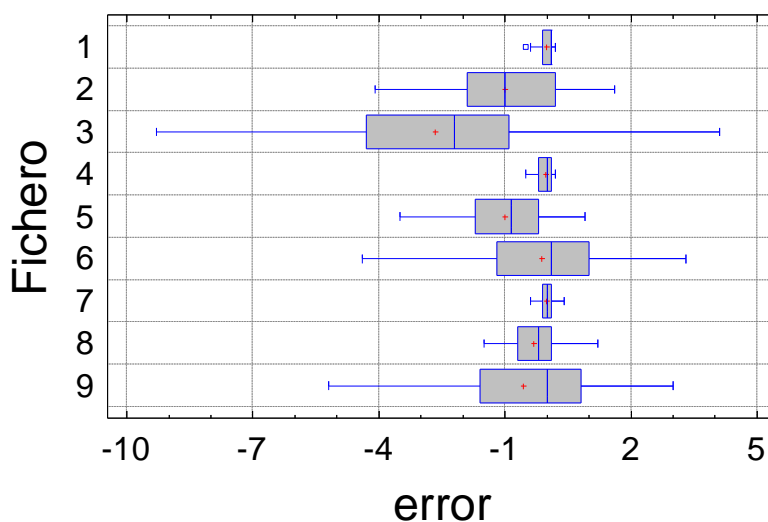


Figura 23. Distribución del error en función del archivo analizado

En este gráfico se muestra la distribución del error que cometieron los participantes al reportar los datos sobre cada uno de los ficheros analizados. Al haber sido restado el valor verdadero a las observaciones, las distribuciones se acercan al origen. Esto último y la eliminación de valores atípicos son las principales diferencias entre esta y la figura 21.

2. METODOLOGÍA

Tabla 8. Estadística descriptiva de la variable error

Archivo	Frecuencia	Valor medio	Desviación típica	Min	Max	Asimetría	Curtosis
1	10,0	0,0	0,2	-0,5	0,2	-1,3	0,6
2	51,0	-1,0	1,3	-4,1	1,6	-0,1	-0,6
3	47,0	-2,7	2,6	-9,3	4,1	-0,5	0,5
4	47,0	0,0	0,2	-0,5	0,2	-0,8	0,1
5	50,0	-1,0	1,0	-3,5	0,9	-0,3	-0,4
6	53,0	-0,1	1,6	-4,4	3,3	-0,5	-0,1
7	46,0	0,0	0,2	-0,4	0,4	-0,4	-0,4
8	45,0	-0,3	0,5	-1,5	1,2	0,0	0,2
9	55,0	-0,6	1,8	-5,2	3,0	-0,7	-0,1

Con el objetivo final de poder analizar la incertidumbre del monitorado de ruido de aviones, resulta necesario analizar cuáles de los factores planteados inicialmente afectan realmente a los resultados. Para ello, en los siguientes apartados se plantean contrastes de hipótesis que deben determinar si la media o la varianza de las distribuciones se ven afectadas por cada uno de dichos factores.

El planteamiento inicial, consistió en efectuar un Análisis de la Varianza (ANOVA) multifactorial, de manera que se pudieran comprobar cuáles son los factores y las interacciones que producen diferencias significativas en los resultados. Dicho modelo exige el cumplimiento de los requisitos de independencia, homocedasticidad y normalidad. Aunque los dos primeros eran asumibles, se pudo comprobar que los residuos resultantes de la aplicación del modelo ANOVA no se ajustan a una distribución normal, con lo que el método ANOVA no pudo ser aplicado.

En las figuras 24 y 25 se observa claramente como la distribución de los residuos se aleja claramente de la línea recta que tendría una distribución gaussiana. Los resultados de los contrastes de la bondad del ajuste respecto a una distribución normal permiten rechazar inequívocamente la hipótesis de normalidad.

Tabla 9. Test de bondad del ajuste

Tipo de contraste	p-valor
Chi-cuadrado	0,00
Kolmogorov-Sminov	0,00
Shapiro-Wilks	0,00
Asimetría	0,00
Curtosis	0,00

Dado que la hipótesis de normalidad no puede ser aceptada, es necesario analizar los datos mediante técnicas estadísticas no paramétricas.

Gráfico de Probabilidad Normal

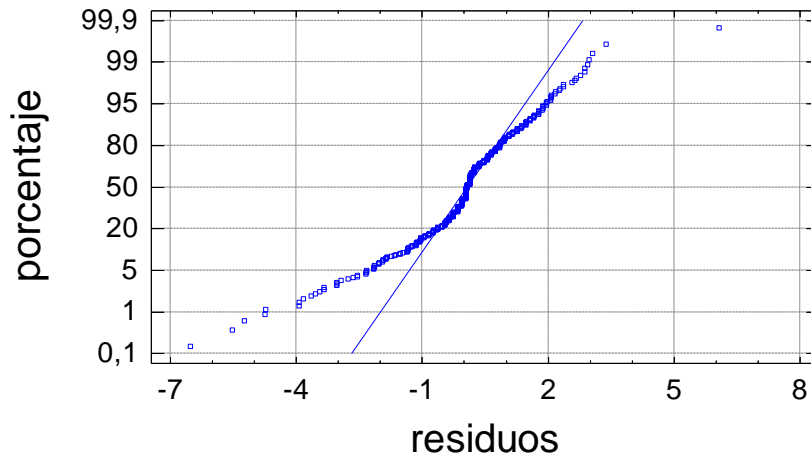


Figura 24. Gráfico de probabilidad normal

La línea fina representa la recta que debería seguir la función de probabilidad de los residuos en el caso de seguir una distribución normal.

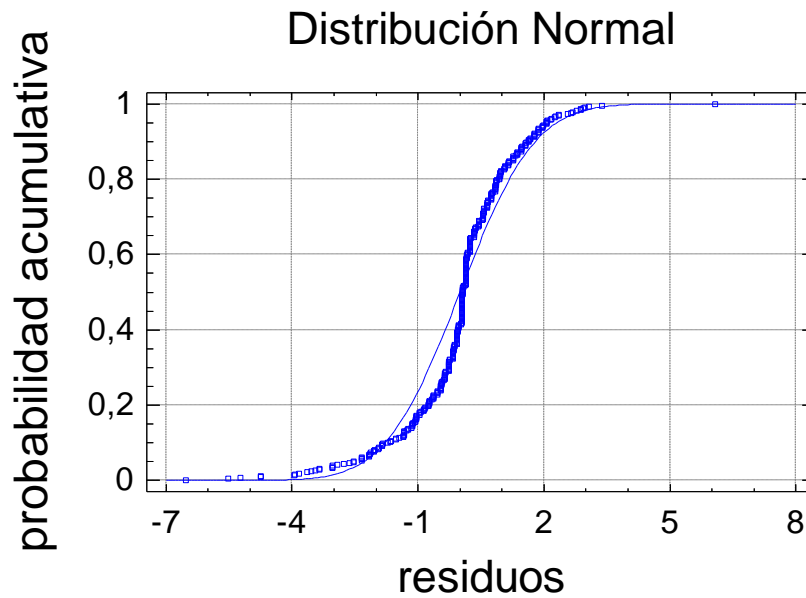


Figura 25. Gráfico de normalidad

La línea fina representa la curva que debería seguir la función de distribución de los residuos en el caso de estos estuvieran normalmente distribuidos.

2.1.2.1 Factor Institución

El organizador no suministró a los participantes ningún tipo de procedimiento relativo a la obtención de los resultados, dándose únicamente indicaciones sobre la obtención de resultados conforme a la norma ISO 20906. Teniendo esto en cuenta, resulta a priori previsible que la institución de procedencia del participante no debe ser un factor que condicione los resultados facilitados. Sin embargo, tampoco podía descartarse por completo que la lectura o interpretación de la citada norma internacional pudiera verse afectada por condicionantes derivados, de forma directa o indirecta, de este factor institución. Por ejemplo, una explicación específica y demasiado concreta de un profesor en referencia a la metodología a aplicar condicionaría a sus alumnos. También podría suceder que el parecido o discrepancia de la ISO 20906 con legislación local en materia de ruido, pudiera condicionar la interpretación por parte de los participantes.

Este análisis se restringió a las instituciones que aportaron a la intercomparación más de 10 participantes, de manera que los datos puedan ser considerados como representativos.

Gráfico de Cajas y Bigotes

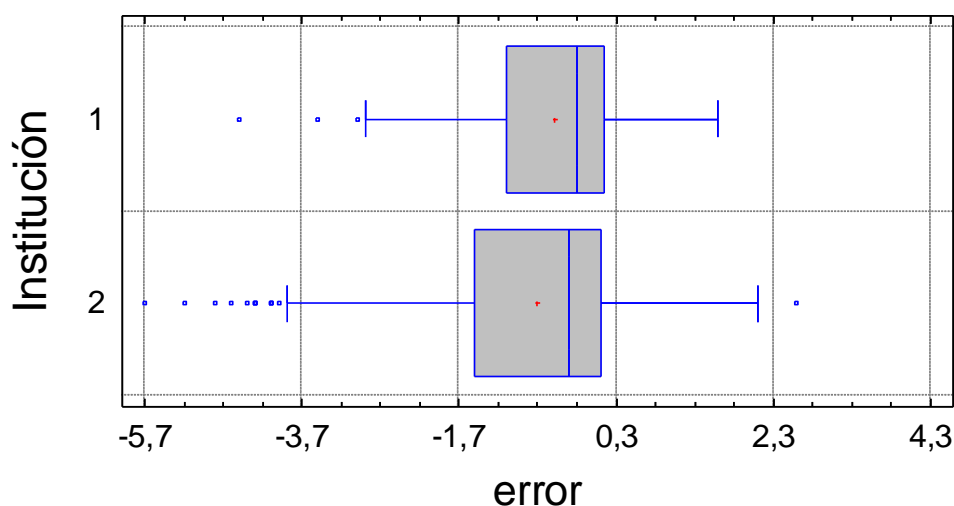


Figura 26. Gráfico de cajas, con respecto al factor Institución

El gráfico representa los valores medios, la mediana, y los cuartiles de la distribución de error en función de la institución de procedencia del participante. Se excluyó de este análisis aquellas instituciones que aportaron uno o dos participantes, ya que no se considera representativo.

Con un simple vistazo a la figura 21 se puede comprobar que no existen grandes diferencias en las distribuciones. No obstante, se ha efectuado un contraste sobre la varianza mediante un test de Lavene. Como se ha comentado, la hipótesis nula en esta prueba afirma que las varianzas de las diferentes poblaciones son iguales, y no puede ser descartada, debido a que el p-valor es 0,19 (mayor que el nivel de significación de 0,05).

2. METODOLOGÍA

Una vez descartada la heterodasticidad, se realizó un test de Kruskal-Wallis con el objetivo de comprobar, con un nivel de confianza del 95%, si los datos muestran diferencias estadísticamente significativas asociadas con el factor institución. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos que ponen de manifiesto que dicho factor no tiene influencia en las observaciones y que por lo tanto puede ser excluido del resto de los análisis efectuados en el presente estudio.

Tabla 10. Test de Kruskal-Wallis para el " Factor Institución"

Institución	Numero de observaciones	Rangos medios
1	72	183,99
2	281	175,21
p-valor = 0,514		

2.1.2.2 Factor experiencia

Como se ha descrito, cada participante fue clasificado conforme a su grado de experiencia en la realización de mediciones acústicas, la evaluación de ruido ambiental y el monitoreo de ruido de aviones. Se crearon inicialmente tres categorías: A para estudiantes, C para expertos en evaluación de ruido y acústica ambiental, y B para aquellos de los participantes que contaban con un cierto grado de experiencia en mediciones acústicas.

Gráfico de Cajas y Bigotes

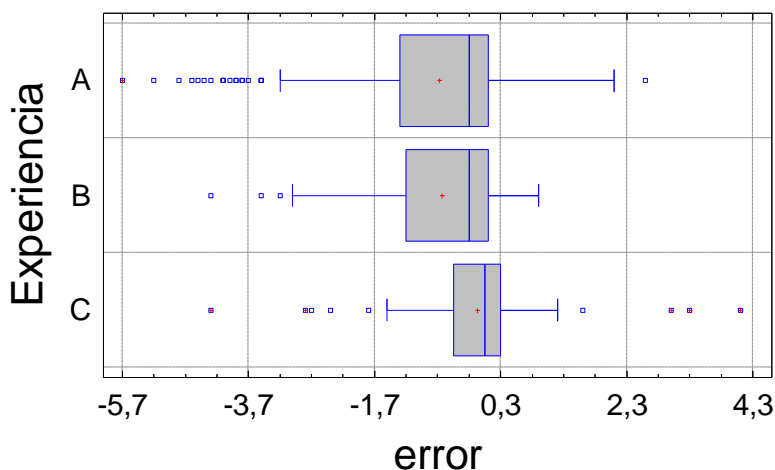


Figura 27. Factor experiencia (inicial, 3 clases)

Las distribuciones correspondientes a cada nivel de experiencia son similares en lo que se refiere a los valores medios y las medianas. No ocurre lo mismo con respecto a la dispersión de las observaciones.

Mientras que el test de Lavene pone de manifiesto que no existen diferencias estadísticamente significativas de la varianza para un nivel de confianza del 95% (p-valor=0.75), el test de Kruskal-Wallis indica que no existen diferencias estadísticamente

2. METODOLOGÍA

significativas. Por lo tanto no podemos descartar que los datos analizados para cada grupo procedan de una misma distribución estadística.

Tabla 11. Test de Kruskal-Wallis para "Factores de experiencia (3 niveles)"

Experiencia	Número de observaciones	Rangos medios
A	285	187,67
B	49	188,90
C	52	223,57
p-valor = 0,10		

A continuación se realizó el mismo análisis para cada uno de los entornos acústicos, llegándose a la misma conclusión para cada uno de ellos. Por lo tanto, el factor experiencia se considerará como no significativo en este estudio.

2.1.2.3 Factor “método de marcado”

Siguiendo el esquema mostrado en la figura 11, el marcado de aviones se realiza en tres fases: detección, clasificación e identificación. En este experimento las dos primeras fases están muy relacionadas entre sí, y pueden realizarse de manera automática o manual, a partir de la observación de la evolución temporal de las medidas⁵. En lo que respecta a la fase de identificación, en este experimento se han considerado tres mecanismos. El método de marcado 3 implica la utilización de las grabaciones sonoras correspondientes a los ficheros de medida. El método de marcado 2 implica la utilización de un listado de eventos sonoros (que en este caso procedían de notas de campo tomadas por técnicos, pero que podrían haber sido resultado de un seguimiento radar). Por último, se denomina método de marcado 1 aquel en el que los técnicos no dispusieron de información adicional para la fase de identificación.

En un primer análisis se trató de evaluar si, tal como era previsible, existían diferencias estadísticamente significativas entre los diferentes métodos de marcado. El gráfico de cajas presentado en la figura 28, muestra diferencias de importancia en las medias y en las varianzas que puedan ser atribuidas al método de marcado.

⁵ En algún caso, alguno de los técnicos podría haber utilizado las grabaciones para un ajuste fino de los momentos de inicio y final de los eventos sonoros. También podría darse el caso de que alguno de los técnicos sólo hay utilizado las grabaciones para las tareas de detección y clasificación, pero esto sólo sería posible para los tres ficheros en que se facilitaron grabaciones (de un total de 9).

Gráfico de Cajas y Bigotes

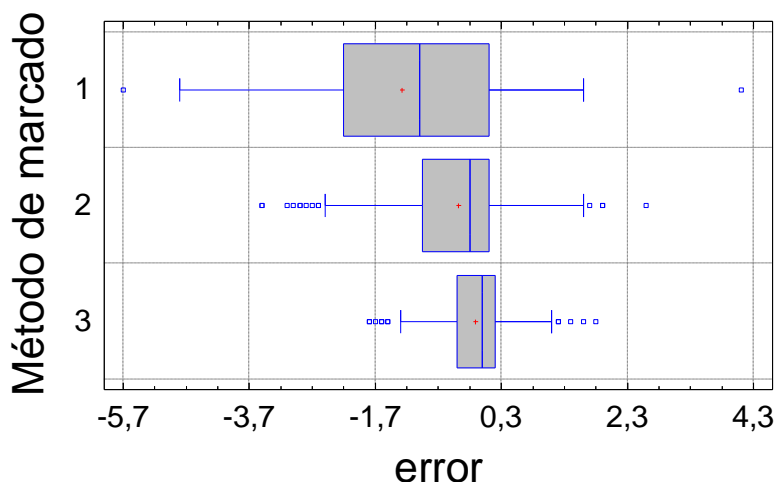


Figura 28. Factor "método de mercado"

Como se puede observar, la ausencia de ayuda al mercado (método 1) desvía el valor promedio del error aumentando la variabilidad de las observaciones. Las diferencias entre los métodos 2 y 3 (listado de evento y grabaciones, respectivamente) son menos acusadas.

La existencia de ayuda al mercado adquirirá una importancia mayor o menor en relación al entorno acústico concreto. Por ese motivo se realizó un análisis más detallado, separando los diferentes entornos acústicos, intentando valorar la importancia del factor ayuda al mercado en cada uno de ellos

En la figuras 29, 30 y 31 se observan las medias y los intervalos de confianza (Bonferroni, 95%) para cada uno de los entornos acústicos. Como se puede observar, a medida que el entorno acústico se hace más complicado, aumenta la dispersión de los resultados reportados. En el Entorno 1, resulta fácil detectar e identificar los eventos, lo que conlleva que no existan diferencias significativas entre los tres métodos. En el Entorno 2, la utilización de grabaciones hace que sea posible ajustar los instantes de inicio y final de los eventos, lo que marca una diferencia clara de este método con respecto a los demás. En el entorno 3, debido al escaso rango de los eventos, buena parte de ellos quedan difuminados en la evolución temporal, por lo que resulta fundamental la utilización de ayuda al mercado. Por otra parte, el escaso rango limita las posibilidades de ajuste en el mercado de eventos, por lo que se reducen las diferencias entre los métodos 2 y 3.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos de Bonferroni

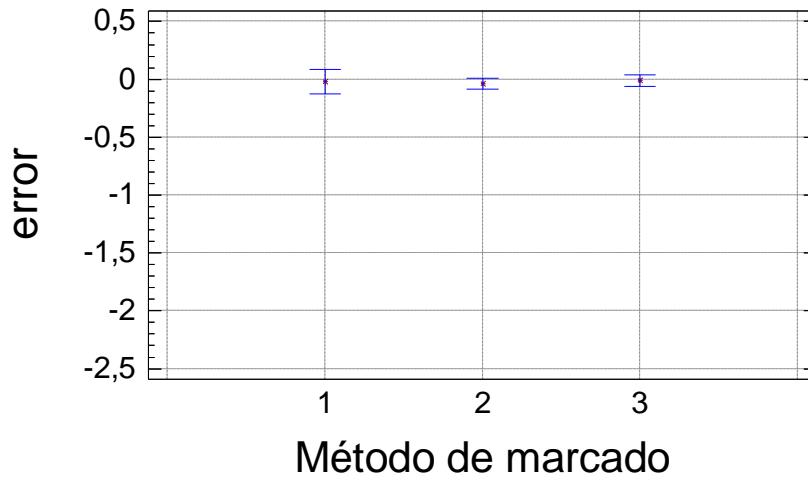


Figura 29. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 1

En el Entorno 1 el rango dinámico de los eventos sonoros es elevado, lo que facilita el marcado de los aviones. Por este motivo las diferencias entre los métodos son reducidas.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos de Bonferroni

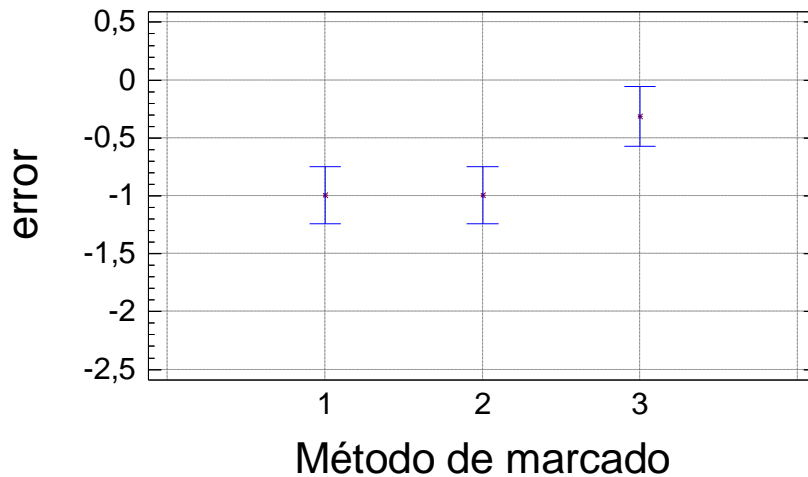


Figura 30. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 2

En el Entorno 2 el rango dinámico de los eventos sonoros sigue siendo elevado, con lo que buena parte de ellos pueden ser marcados sin dificultad. Por ese motivo no se aprecian diferencias relevantes entre los métodos de marcado 1 y 2 (sin ayuda, frente al uso de un listado de eventos). La ayuda de grabaciones (método 3) permite ajustar los momentos de inicio y fin, cambiando la distribución de los resultados reportados.

Medias y 95,0 Porcentajes Intervalos de Bonferroni

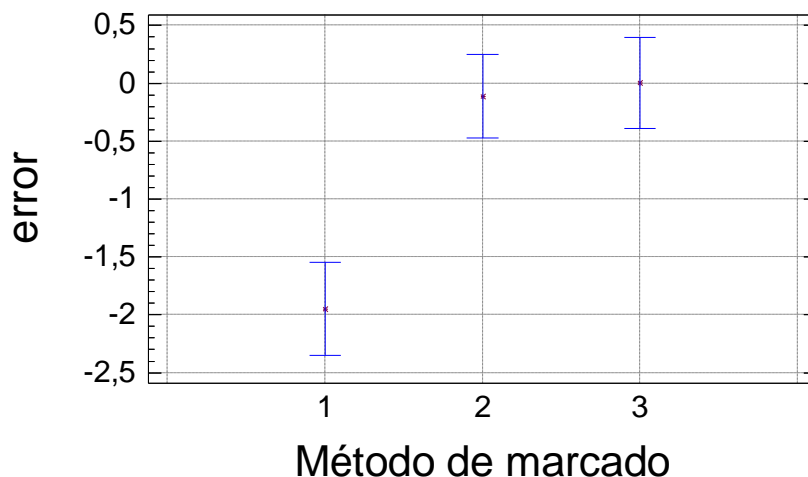


Figura 31. Intervalos de Bonferroni para el método de marcado en el Entorno 3

En el Entorno 3 aumenta la dificultad de marcado de aviones. Por este motivo la ausencia de ayuda al marcado desvía considerablemente la distribución de los resultados con respecto a los otros dos métodos.

A la vista de los resultados, se aplicaron los test de Lavene y Kruskal-Wallis en el Entorno 1, constatándose que en este entorno no resulta posible rechazar las hipótesis nulas, con lo que podemos aceptar que los datos se ajustan a una misma distribución estadística. Por lo tanto, en este entorno la utilización de ayuda al marcado no resulta un factor significativo.

Cuanto menor es el rango de los eventos sonoros, o en presencia de eventos sonoros de otro origen, la utilización de ayuda al marcado gana importancia, afectando a las medias y varianzas de los resultados reportados.

Sin embargo, en el análisis efectuado llama la atención de manera particular el hecho de que existan diferencias significativas entre los dos métodos de ayuda utilizados. Mientras que en el Entorno 1 las pruebas estadísticas efectuadas permiten aceptar que ambos métodos presentan a una misma distribución estadística (Entorno 1: p-valor Lavene=0,64 y p-valor Kruskal-Wallis=0,53). En el Entorno 2 puede descartarse las hipótesis nulas de igualdad de varianzas y medianas (Entorno 2: p-valor Lavene=0,00 y p-valor Kruskal-Wallis=0,00), lo que indica que existen diferencias estadísticamente significativas entre la utilización para el marcado de grabaciones o listado de eventos. En lo referente al Entorno 3 el test de Lavene no permite aceptar la igualdad de las varianzas, por lo tanto en este entorno existen diferencias significativas entre las distribuciones correspondientes a la utilización de grabaciones o listado de eventos.

2.1.2.4 Factor rango del evento

Como es obvio, el nivel de ruido causado por los aviones en las tres localizaciones de medida no será el mismo, y por lo tanto la esperanza de los valores reportados por los participantes será distinta dependiendo de la localización. Sin embargo dicho efecto es eliminado al analizarse la variable error en lugar de L_{aircraft} .

Por otra parte, el ruido residual afecta a las mediciones de dos maneras distintas. Por una parte, durante la medida del paso de los aviones detectados el ruido de fondo (en esta acepción distinguimos los conceptos ruido de fondo y ruido residual) es medido de manera simultánea al ruido específico, contamina la medición y por lo tanto afecta a los resultados. Por otra parte, la presencia del ruido residual afecta al proceso de detección, provocando una cierta incertidumbre asociada a los instantes de inicio y final del marcado de eventos, esto resulta independiente de que posteriormente el ruido de fondo afecte a la medida.

La primera de estas influencias es equivalente a lo que ocurre en cualquier tipo de medición acústica, y puede ser anulada mediante lo que habitualmente se denomina “corrección por ruido de fondo”. Dicha aportación de la incertidumbre queda contemplada en la norma ISO 20906, y queda fuera del ámbito de este trabajo.

Sin embargo, la influencia del ruido residual sobre el marcado (especialmente en la fase de detección) difícilmente podrá ser corregida, e implicará un factor de incertidumbre, que es el que se pretende describir y cuantificar en la medida de lo posible gracias al experimento.

Denominamos rango de un evento sonoro a la diferencia entre el nivel sonoro $L_{\text{Aeq},1s}$ en el pico del evento, y el nivel de ruido residual (figura 32).

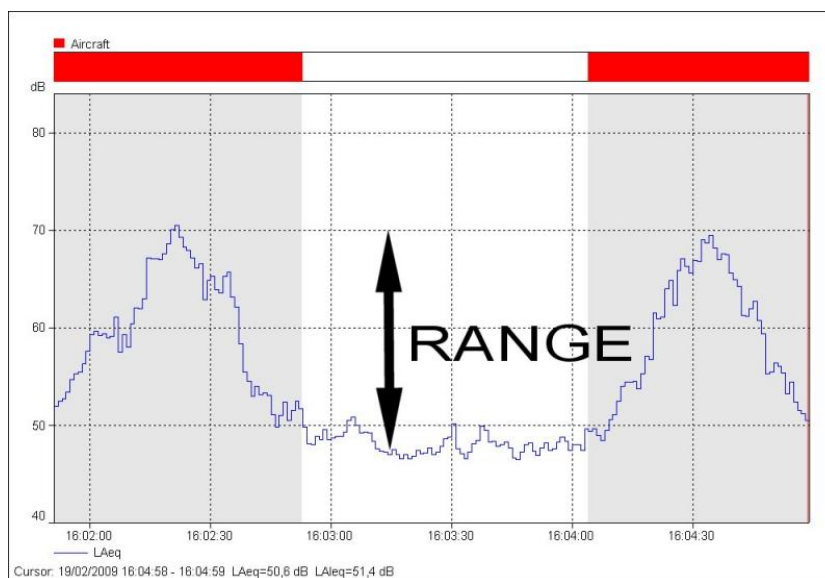


Figura 32. Rango de un evento sonoro

El rango de un evento sonoro viene determinado por la diferencia entre el nivel más alto alcanzado por el suceso sonoro y el nivel del ruido residual. Una variación del nivel de ruido residual afectará tanto al rango como a la duración de los eventos sonoros.

2. METODOLOGÍA

Evidentemente la influencia que el ruido residual puede tener sobre el marcado se producirá en la parte baja de los eventos, en las que el nivel sonoro que produce el avión es comparable con el ruido residual. En la figura 22 se ilustra el efecto que el rango puede tener sobre el marcado de los aviones.

En el caso de referencia (Figura 33a) el ruido residual es sumamente bajo. El tramo coloreado del registro sonoro se utiliza para calcular el nivel de exposición sonora, $L_E = 90$ dBA.

A medida que el ruido residual se incrementa (Figura 33b), será necesario incrementar los umbrales del detector para evitar falsos positivos. En el caso de detección manual, el ruido residual no dejará oír el avión, por lo que el efecto es equivalente a un incremento del umbral.

La parte coloreada en rojo queda excluida de la medida del L_E . Sin embargo, la mayor parte de la energía está acumulada alrededor del pico del evento, y la influencia de la zona descartada es menor que la resolución del equipo de medida.

Según se reduce el rango del evento, es mayor la parte excluida de la medida, y cuando la aportación de la zona descartada supera los 0,1 dB de la resolución del instrumento (posiblemente antes de esta cifra), el resultado reportado varía (Figura 33c). A partir de este punto, el resultado de la medida se hace mucho más sensible a los instantes de inicio y finalización del marcado, por lo que pequeños incrementos en el umbral afectan en mayor manera a la medida (Figura 33d).

Así pues, la variabilidad en los instantes de inicio y final del evento (directamente relacionados con el rango) aportará incertidumbre en el resultado reportado de cada uno de los eventos sonoros, y por lo tanto incrementará la incertidumbre de la evaluación del ruido de aviones ($L_{\text{aircraft,D}}$).

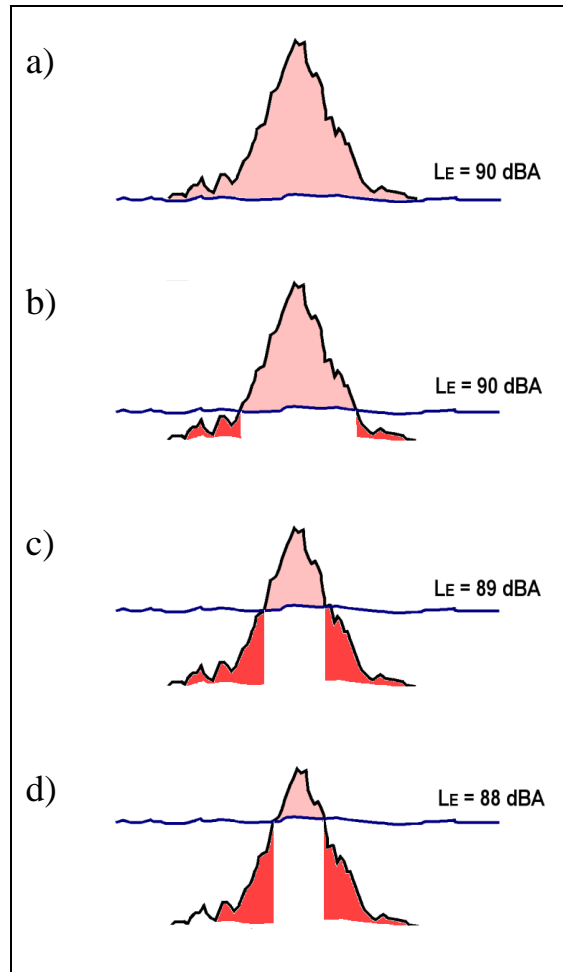


Figura 33. Efecto del rango del evento sobre la medida

Cuando el ruido residual es bajo y el rango del suceso sonoro es elevado, la discriminación de dicho evento es sencilla, y un pequeño desajuste en los instantes de inicio y final de la medida apenas tendrá influencia en los resultados. Sin embargo, a medida que el ruido residual se eleva, reduciendo el rango del evento, la cantidad de energía acústica no incluida en la medida (rojo) aumenta, y el nivel de exposición asignado al avión (rosa) se reduce. A la vez, este indicador se hace más sensible a las variaciones del instante de inicio y final del evento, lo que provoca un aumento de la incertidumbre.

2. METODOLOGÍA

Los objetivos del experimento, respecto a este factor, consisten en determinar si la media o la varianza de las distribuciones se ven afectadas por el rango de los eventos sonoros, teniendo en cuenta que el rango está relacionado con el ambiente acústico de los ficheros analizados según la siguiente tabla.

Tabla 12. Descripción de los rangos asociados a los entornos acústicos

Entorno acústico	Rango
1	>20 dB
2	10-20 dB
3	<10 dB

En la figura 34 se muestra la dispersión de los resultados para los diferentes entornos acústicos. En este caso se han excluido las observaciones efectuadas sin ayuda al marcado, con lo que pone claramente de manifiesto que existen diferencias, tanto en los valores promedio como en las varianzas, que son claramente achacables al entorno acústico y al rango de los eventos sonoros existentes.

Gráfico de Cajas y Bigotes

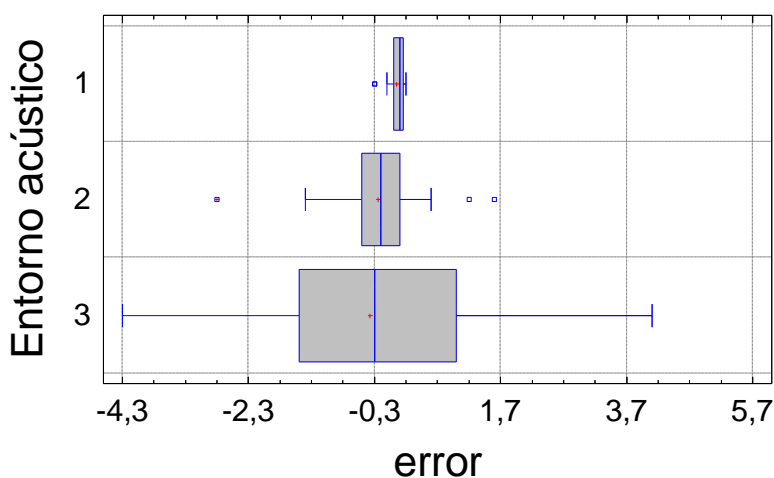


Figura 34. Efecto del entorno acústico

La dispersión de las observaciones aumenta a medida que el rango dinámico de los eventos disminuye, dado que esto dificulta las tareas de discriminación. Además, el error medio obtenido en el Entorno 1 (más sencillo de analizar) es menor que en el resto de los entornos.

2.1.3 Estimación de la incertidumbre asociada a la detección

Una vez definidos los principales factores que contribuyen a la variabilidad de las medidas (rango y ayuda al marcado), en esta sección se describe la metodología que debe aplicarse para estimar la incertidumbre asociada a los resultados reportados. En concreto, el objetivo consiste en estimar la contribución a la incertidumbre asociada a la discriminación (marcado) de los eventos sonoros: u_{detect} .

El modelo de incertidumbre que se ha utilizado está basado en el descrito en la norma ISO 20906:

$$L_{aircraft,ij} = TV_j + \delta_{stm} + \delta_{residual} + \delta_{ident} + \delta_{detect} \tag{Ec 8}$$

donde el primer término se refiere al valor verdadero del entorno acústico j, los tres siguientes términos describen la influencia de equipo, del ruido de fondo y del sistema de clasificación/identificación (los tres despreciables debido al diseño del experimento) y el cuarto refleja la influencia del sistema de detección, objeto de análisis.

El primer paso consistió en analizar el gráfico de interacción entre los dos factores analizados, planteando la posibilidad de evaluar por separado cada uno de los efectos.

Gráfico de Interacción

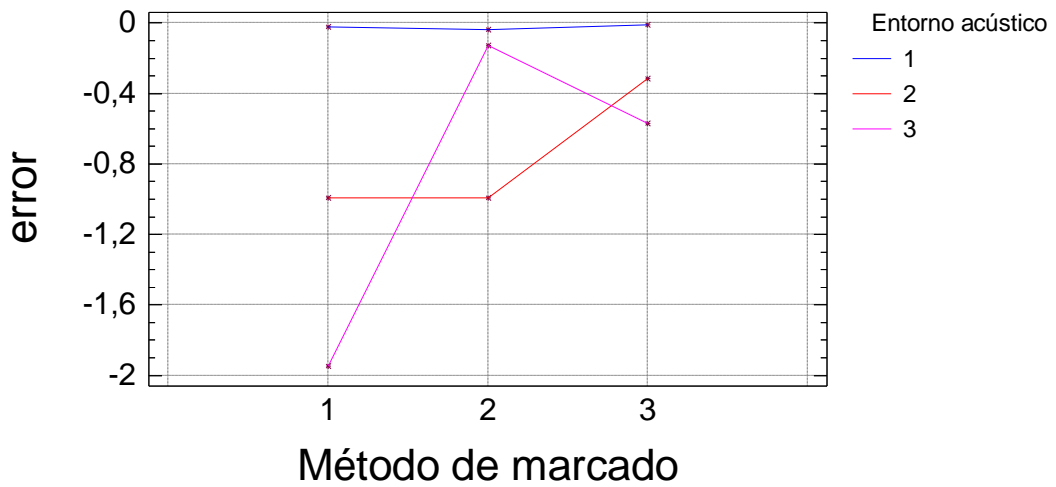


Figura 35. Gráfico de interacción entre los factores

El gráfico de interacción pone de manifiesto que en el Entorno 1 resulta la utilización de uno u otro método de marcado resulta irrelevante, ya que el error medio es prácticamente el mismo en los tres casos. Cuando se evalúa un entorno acústico diferente, no sólo se produce una desviación del valor medio del error cometido, sino que además, debido a la interacción entre los factores, dicha desviación es distinta en función del método de evaluación evaluado, por lo que las tres líneas no discurren en paralelo.

2. METODOLOGÍA

Como se observa en la figura 35, existe una clara interacción entre los factores, que ocasiona que el error medio cambie en cada entorno acústico de manera distinta en función del método de ayuda al marcado empleado. La utilización de ayuda al marcado apenas tiene influencia en los entornos con eventos sonoros de mayor rango, mientras que dicha influencia aumenta cuando el rango se reduce. Además, dependiendo del entorno acústico en que nos encontremos, la utilización de una u otra ayuda al marcado también resulta relevante.

Por lo tanto, u_{detect} no será analizada como la aportación independiente de dos factores, sino que se realizará su estimación para diferentes casos.

En referencia a los métodos de cálculo, la GUM(International Organization for Standardization. Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology 2008) proporciona las principales pautas y directrices referentes a los múltiples aspectos que intervienen en la evaluación de la incertidumbre. Lamentablemente, los resultados de este experimento no permitieron la aplicación de este marco, debido a que no se cumple el criterio de normalidad en las observaciones.

Ante la imposibilidad de aplicar el enfoque paramétrico del GUM, otra manera posible de estimar los intervalos de confianza que definen la incertidumbre es de manera analítica a través de la desigualdad de Tchebycheff. Sin embargo, dado que se pretende obtener un nivel de confianza del 95%, el factor de cobertura resulta muy alto (4.472) con lo que el dato de incertidumbre obtenido estaría claramente sobrestimado.

Así pues, la alternativa consiste en la utilización de métodos no paramétricos para la estimación de la incertidumbre.

La siguiente tabla resume los pasos realizados para la estimación de la incertidumbre. Con la intención de afianzar los conceptos descritos, e intentando mantener la compatibilidad con los descritos en el GUM, nos referimos mediante “u” (minúscula) a la incertidumbre estándar asociada al factor, u_c es la incertidumbre combinada y U (mayúscula) la incertidumbre expandida.

Estimación del valor verdadero
En primer lugar fue necesario calcular el valor verdadero correspondiente al nivel sonoro producido por los aviones (L_{aircraft}) en cada uno de los entornos acústicos analizados. Se ha considerado que la mejor estimación del valor verdadero se corresponde con el promedio de los resultados proporcionados por los expertos cuando estos utilizaban ayudas al marcado.
Cálculo del error
A partir del valor verdadero se puede calcular el “error” cometido en cada una de las observaciones.
Bloquear casos
Debido a la existencia de interacción entre los factores, ha sido necesario cuantificar los datos de incertidumbre para cada un total de 9 casos, que corresponden a la utilización de tres métodos de marcado en tres entornos acústicos.

2. METODOLOGÍA

Estimar el intervalo de credibilidad

Con la ayuda de un método no paramétrico se estimará el intervalo de credibilidad para las distribuciones bloqueadas. En concreto se utilizará el método bootstrap studentizado, con un remuestreo de 100000 casos para cada uno de los bloques contemplados. Los intervalos de credibilidad presentados se obtuvieron para un nivel de significación del 0.05, lo que equivale a un nivel de confianza del 95%.

Estimación de la incertidumbre expandida

Al haber sido establecidos bloques para la realización del análisis la incertidumbre expandida en cada bloque realmente es provocada por un único factor. En la mayor parte de los casos el intervalo de credibilidad no se encuentra centrado con respecto al origen. En este sentido, adoptando la hipótesis más conservadora se ha asumido como incertidumbre expandida U_{detect} como el valor absoluto más alto de los extremos. Además, se ha realizado un redondeo al alza, para expresar la incertidumbre con un único decimal. Por lo tanto, la incertidumbre quedará ligeramente sobrestimada.

Estimación de la incertidumbre combinada

Para poder expresar la incertidumbre combinada asociada al factor, resulta necesario conocer el factor de cobertura K , y para ello el número de grados de libertad. Como la incertidumbre calculada en este estudio será tratada como una incertidumbre de tipo B, con una distribución uniforme, esta debe ser la consideración que debe realizarse en este cálculo inversión.

Por lo tanto se asumirá que $K=2$, y el número de grados de libertad infinito, con lo que:

$$u_{c,detect} = \frac{U_{detect}}{2} \quad \text{para } K = 2 \quad \text{Ec 9}$$

Estimación de la incertidumbre estándar

En este caso, tanto en el cálculo inverso (aplicado en el trabajo para la obtención de la incertidumbre estándar), como en el caso del cálculo directo (aplicado en un caso real para estimar la incertidumbre expandida de múltiples factores), el coeficiente de sensibilidad del factor analizado es 1, por lo que en el caso que nos aplica:

$$u_{detect} = \frac{u_{c,detect}}{\sqrt{\sum_{i=1}^1 \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2}} = u_{c,detect} \quad \text{Ec 10}$$

La aplicación de esta metodología permitirá cuantificar de forma bastante aproximada la incertidumbre de detección en aquellos casos los que se utilizó ayuda al mercado (métodos 2 y 3), ya que en estos casos la influencia de falsos positivos y falsos negativos resulta despreciable. Sin embargo, cuando se carece de ayuda al mercado (método 1) las tasas de error en la clasificación e identificación tendrán también un efecto que queda incorporado en la estimación de la incertidumbre efectuada.

3 RESULTADOS

3.1 CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE ESTANDAR DE DETECCIÓN

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos en los diferentes pasos asociados a la estimación de la incertidumbre.

En el entorno de matlab se aplicaron los filtros correspondientes a cada casilla de la tabla (fila y columna), y se realizó una estimación de la función de distribución acumulada. La figura 36 muestra las funciones de distribución obtenidas para cada entorno según el método de marcado empleado

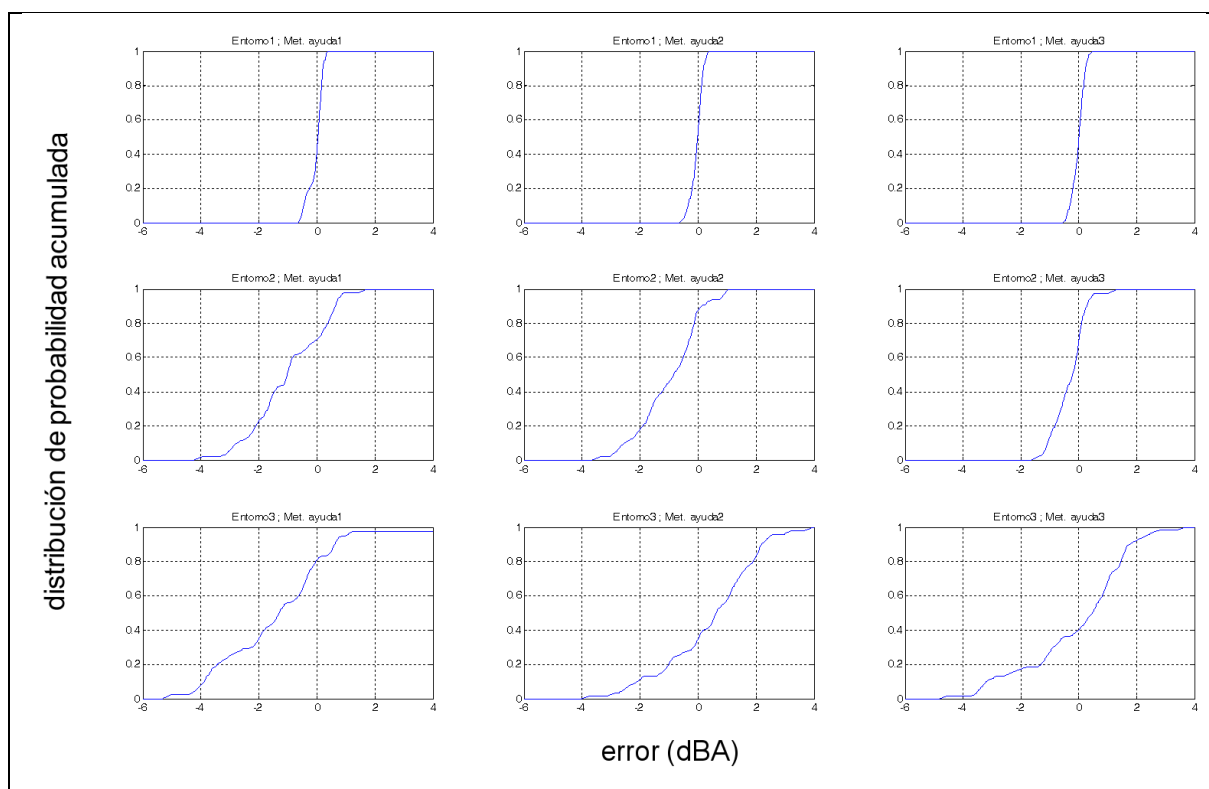


Figura 36. Funciones de distribución de la variable error

En esta figura se presenta la función de distribución acumulada (y suavizada) correspondiente a los datos reportados para cada entorno y método de ayuda al marcado. La gráfica presenta una pendiente pronunciada en el entorno 1, ya que los datos tienen poca dispersión. A medida que el entorno acústico aumenta, la pendiente de la curva baja, ya que la dispersión de los datos aumenta.

A partir de este análisis se realizó una estimación de los intervalos de credibilidad del error, y estos fueron relacionados con la incertidumbre.

La Tabla 13 muestra los intervalos de confianza obtenidos. Como puede observarse el intervalo de credibilidad resulta más ancho cuando no se dispone de ayuda al marcado, lo que implica una mayor incertidumbre en la medida. Además se puede observar que los intervalos no son simétricos con respecto al origen,. Una de las posibilidades contempladas para la estimación de la incertidumbre consistía en la corrección de los resultados para centrar las distribuciones.

3. RESULTADOS

Sin embargo, en cada uno de los entornos, y en función del método de marcado utilizados, sería necesario aplicar una corrección distinta. Por este motivo, se ha considerado más adecuado asumir una hipótesis más conservadora, que consiste en estimar la incertidumbre expandida a partir del extremo de la distribución más alejado del origen. Los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 13. Intervalos de credibilidad para el error

Intervalos de credibilidad para el error (dBA)		Rango dinámico de los eventos (dBA)		
		>20	10 a 20	<10
Ayuda al marcado	Sin ayuda	[-0,5 , +0,2]	[-3,2 , +0,8]	[-4,3 , +1,1]
	Con listado eventos	[-0,5 , +0,2]	[-2,9 , +0,9]	[-3,0 , +3,1]
	Con grabaciones	[-0,4 , +0,2]	[-1,2 , +0,4]	[-3,6 , + 2,6]

Tabla 14. Incertidumbre expandida (U_{detect})

U_{detect} (dBA)		Rango dinámico de los eventos (dBA)		
		>20	10 a 20	<10
Ayuda al marcado	Sin ayuda	0,5	3,2	4,3
	Con listado eventos	0,5	2,9	3,1
	Con grabaciones	0,4	1,2	3,6

Asumiendo que esta incertidumbre de tipo B se corresponde con una distribución uniforme, se asumen sus infinitos grados de libertad, y por lo tanto $K=2$, obteniéndose los valores de incertidumbre estándar mostrados en la tabla 15.

Tabla 15. Incertidumbre estándar (u_{detect})

u_{detect} (dBA)		Rango dinámico de los eventos (dBA)		
		>20	10 a 20	<10
Ayuda al marcado	Sin ayuda	0,3	1,6	2,2
	Con listado eventos	0,3	1,5	1,6
	Con grabaciones	0,2	0,6	1,8

A partir de los resultados mostrados en las tablas anteriores, podemos comprobar también que la utilización de grabaciones lleva a una menor dispersión de los resultados, y que la incertidumbre aumenta a medida que el entorno acústico presenta rangos dinámicos más reducidos.

4 CONCLUSIONES

En este Trabajo Fin de Máster se ha realizado una descripción de los principales conceptos relacionados con la evaluación por medida del ruido en aeropuertos. Se han descrito las técnicas de medida y procesado de datos involucrados en el monitorado de ruido, poniendo de manifiesto la relevancia de los sistemas de discriminación del ruido provocado por los aviones.

Posteriormente, tomando como referencia la norma internacional ISO 20906 referente al monitorado automático y desatendido del ruido producido por aviones, se han descrito las principales causas de incertidumbre en la medida. Entre las diferentes contribuciones a la incertidumbre que se han analizado, esta investigación se ha centrado en aquellas relacionadas con los sistemas de detección, clasificación e identificación de ruido de aviones.

Una vez centrado el objetivo, se ha desarrollado una base metodológica para la determinación de los factores que afectan a la incertidumbre, y la cuantificación de su contribución a la incertidumbre del monitorado.

Al margen de las tasas de fallo/acierto del sistema, con esta investigación se pretendía estudiar si existen otros factores que incorporan incertidumbre a la medida, analizando sus causas y cuantificando su contribución. Para ello, se ha diseñado un experimento basado en el concepto desarrollado por los ejercicios de intercomparación interlaboratorio. Han participado en dicho ejercicio más de 60 personas con una titulación universitaria, procedentes de 5 universidades europeas. El grado de implicación de los participantes en el proceso ha superado las expectativas planteadas, y, aunque se han observado un porcentaje de alrededor del 10% de observaciones atípicas, tan sólo un porcentaje mínimo podría ser achacable al desinterés del participante.

En lo referente a la concepción y elaboración del experimento, así como en lo que se refiere al análisis cualitativo del mismo podemos extraer las siguientes conclusiones:

- La norma de referencia, la ISO 20906 presenta algunos aspectos que pueden resultar de difícil comprensión ante la ausencia de documentación adicional. Esto es precisamente lo que sucede en referencia a la expresión de los resultados con respecto al intervalo de referencia de evaluación. Fueron muchos los participantes que cometieron errores relacionados con la confusión entre el intervalo de medida y el intervalo de evaluación. Para salvar esta circunstancia, se considera que hubiera sido conveniente facilitar a los participantes documentación adicional que les permitiera contextualizar la información solicitada.
- Fueron muchos los participantes que confundieron los índices acústicos que debían utilizar a la hora de reportar resultados.
- El hecho de haber requerido a los participantes el envío de los ficheros de trabajo, y no únicamente el formulario con los datos reportados, ha permitido rescatar resultados reportados erróneamente en el formulario.
- La experiencia del participante en la realización de mediciones en el campo de la acústica ambiental se ha mostrado como fundamental a la hora de evitar los errores indicados en el punto anterior.

4. CONCLUSIONES

- Muchos de los participantes no estaban familiarizados con el uso del software de procesado (Brüel & Kjaer Evaluator type 7820), sin embargo dicha circunstancia no ha supuesto ningún tipo de problema debido a la facilidad de su uso. Indudablemente la utilización del software ha facilitado el trabajo de los participantes, lo que ha permitido aumentar el número de participaciones y de resultados válidos. La ausencia de dicho software hubiera ocasionado un motivo adicional de error en los resultados.
- Se ha podido comprobar que resulta inadecuado analizar directamente los resultados reportados por los participantes, ya que la interacción entre los diferentes factores origina errores en la interpretación de los resultados. Por este motivo fue necesario realizar una transformación de dichos resultados a términos de error relativo a un valor real de la medida en cada uno de los entornos de estudio. Realizar esta operación permitió detectar errores cometidos en el análisis de las hipótesis planteadas.
- El valor real estimado, y asignado a cada uno de los entornos para el cálculo del error en cada observación, fue calculado a partir de los promedios obtenidos por los expertos cuando contaron con ayuda al marcado de los aviones. La utilización de restricciones distintas para dicho cálculo no afectará a los contrastes de hipótesis efectuados ni a las conclusiones obtenidas, si bien podría afectar a los intervalos de credibilidad cuantificados, pudiendo por lo tanto desviar los datos numéricos asociados a la incertidumbre.
- En la fase de diseño del experimento se eligió un entorno acústico en el que el peso relativo de los aviones era bajo en relación al ruido residual, y en el que los principales eventos sonoros detectables no habían sido producidos por los aviones. La elección de este fichero, una vez analizados los resultados se considera un desatino, ya que los grandes eventos sonoros no aeronáuticos introducían una deriva en los resultados reportados sin ayuda al marcado. Dado el peso de dichos eventos, la variabilidad en los resultados reportada por los participantes era mucho menor que en los casos en que, gracias a la utilización de ayuda al marcado, pudieron descartar dichos falso positivos. Además, la inclusión de dichos eventos compensaba un número de falsos negativos, con lo que podía llegarse a la conclusión errónea de que en los entornos más difícil resulta más adecuado carecer de elementos de ayuda al marcado. Gracias a que se tenían los ficheros procesados por los participantes, fue posible corregir esta circunstancia, excluyendo por completo los falsos positivos del entorno de medida tres. De esta manera, se consigue eliminar un sesgo existente en los datos reportados, y el análisis de la variabilidad vuelve a minimizar los efectos de las tasas de error y acierto del sistema, centrándose también en este caso en la incertidumbre de detección, y dando consistencia a la comparación entre los tres métodos de ayuda empleados.

Respecto al análisis de los resultados desde el punto de vista del cumplimiento de los objetivos previstos, el análisis de los factores que afectan a la incertidumbre y su cuantificación, extraemos las siguientes conclusiones:

- En lo referido a la detección de los eventos sonoros y a la incertidumbre que afecta a la medida la concreción de los instantes de inicio y final de los eventos, la configuración de umbrales..., se ha podido constatar que no existen diferencias

4. CONCLUSIONES

significativas entre los resultados reportados por los expertos y el resto de categorías. Por este motivo, dicho factor ha sido excluido en el proceso de cuantificación de la incertidumbre.

- Tampoco se han registrado diferencias estadísticamente significativas achacables a la institución de procedencia de los participantes.
- Por el contrario, sí se han encontrado diferencias estadísticamente significativas asociadas al entorno acústico. Estas diferencias se deben a la existencia de un ruido residual que dificulta las labores de detección, y que, en función del rango de los eventos sonoros hace que los instantes concretos de inicio y final del eventos sonoro adquieran un peso mayor o menor sobre los resultados reportados y su variabilidad.
- También el factor “método de marcado” es motivo de diferencias estadísticamente significativas en los resultados. Tal y como era previsible la utilización o no de ayuda al marcado resulta importante en los entornos más difíciles, en los que el rango de los eventos sonoros es menor. Sin embargo, no eran previsibles a priori las diferencias que se han apreciado entre la utilización de un listado de eventos sonoros o de grabaciones. Dichas diferencias han aparecido en el entorno acústico con rangos dinámicos de los eventos medios (entre 10 y 20 dBA).
- En función de los dos factores de influencia encontrados (entorno acústico y tipo de ayuda la marcado), se ha realizado la estimación de la incertidumbre correspondiente a cada una de las 9 combinaciones posibles. Se ha podido corroborar una tendencia creciente de la extensión de los intervalos de credibilidad establecidos se carece de ayuda al marcado, así como cuando el rango dinámico de los eventos sonoros disminuye.
- Tras la cuantificación efectuada de la incertidumbre estándar de detección, se considera que en algunos entornos acústicos dicha componente no resulta despreciable, por lo que no debería ser descartada a priori, debiendo ser incluida de los cálculos de incertidumbre, junto con la incertidumbre de identificación y el resto de componentes mencionadas en la norma ISO 20906.

Para concluir, a continuación se detallan algunas de las aportaciones y utilidades derivadas de los trabajos realizados en este trabajo fin de máster:

- La descripción metodológica facilitada permite su aplicación al estudio y cuantificación de la incertidumbre en la medición de ruido en aeropuertos.
- La información facilitada en este documento podrá ser de utilidad en la planificación de campañas de monitorado de ruido temporales, en la que los requisitos de calidad, y los entornos acústicos donde se realicen las medidas, determinarán la posibilidad de utilizar mediciones atendidas o desatendidas.
- Se ha obtenido un conjunto de mediciones acústicas “patrón” que pueden ser utilizadas como plataforma de prueba para sistemas de detección, clasificación e identificación automáticos basados en análisis sonoro.
 - A la vista de los resultados y de la funcionalidad conseguida, se plantea como una opción de máxima utilidad la utilización de las bases asentadas en este documento para la preparación de ejercicios de intercomparación online (e-comparisons) que puedan ser empleadas como herramientas de aseguramiento de la calidad de los ensayos y calibraciones, permitiendo reducir los costes a los laboratorios participantes, y ampliando enormemente el rango geográfico de participación.

5 BIBLIOGRAFÍA

ADAMS, K., 2004a. *Aircraft Noise Event Detection - the Threshold Problem*. Prague ed.

ADAMS, K., 2004b. *Aircraft Noise Events - the Cornerstone of Monitoring*. Australia ed.

Adobe., 2011. *Adobe Audition*.

ANDRINGA, T.C., VAN HENGEL, P.W.J., MUCHALL, R. and NILLESEN, M.M., 2004. *Aircraft Sound Level Measurements in Residential Areas using Sound Source Separation*. , 2004,.

ASENSIO, C., RUIZ, M. and RECUERO, M., 2010. Real-Time Aircraft Noise Likeness Detector. *Applied Acoustics*, 6, vol. 71, no. 6, pp. 539-545 ISSN 0003-682X. DOI DOI: 10.1016/j.apacoust.2009.12.005.

BEKEBREDE, G. and HAGENBERG, T.H.M., 1984. *Design of a Flight Track and Aircraft Noise Monitoring System*. Toulouse, France ed.

BLACK, D.A., BLACK, J.A., ISSARAYANGYUN, T. and SAMUELS, S.E., 2007. Aircraft Noise Exposure and Resident's Stress and Hypertension: A Public Health Perspective for Airport Environmental Management. *Journal of Air Transport Management*, 9, vol. 13, no. 5, pp. 264-276 ISSN 0969-6997. DOI DOI: 10.1016/j.jairtraman.2007.04.003.

Brüel & Kjaer., 2007. *Evaluator Type 7820*.

CHIANG, D., FISHBEIN, W. and SHEPPARD, D., 1993. *Acoustic Aircraft Detection Sensor*.

COUVREUR, C., FONTAINE, V., GAUNARD, P. and MUBIKANGIEY, C.G., 1998. Automatic Classification of Environmental Noise Events by Hidden Markov Models. *Applied Acoustics*, 7, vol. 54, no. 3, pp. 187-206.

COUVREUR, C. and LANIRAY, M., 2004. *Automatic Noise Recognition in Urban Environments Based on Artificial Neural Networks and Hidden Markov Models*. , 2004,.

COWLING, M., 2004. *Non-Speech Environmental Sound Classification System for Autonomous Surveillance*. Griffith University.

COWLING, M. and SITTE, R., 2003. Comparison of Techniques for Environmental Sound Recognition. *Pattern Recognition Letters*, 11, vol. 24, no. 15, pp. 2895-2907.

David M. Jones, Eric H. Matheson-Jones and Ronald R. Spillman., 2007. *A Review of Current Long-Term Environmental Sound Level Measurement Technologies*. , Mayo 2007,.

DIAZ, M.C. *Introducción a La Inferencia Bayesiana*.

DUFOURNET, D. and JOUENNE, P., 1997a. *Madras, an Intelligent Assistant for Noise Recognition*. INTER-NOISE 97.

DUFOURNET, D. and ROZWADOWSKI, A., 1997b. *Automatic Noise Source Recognition*.

5. BIBLIOGRAFÍA

European Parliament., 2002. *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise*. European Directive ed.

FIDELL, S., PEARSONS, K., TABACHNICK, B.G. and HOWE, R., 2000. Effects on Sleep Disturbance of Changes in Aircraft Noise Near Three Airports, 05/00/, vol. 107, no. 5, pp. 2547.

FRANSSSEN, E.A.M., van Wiechen, C M A G., NAGELKERKE, N.J.D. and LEBRET, E., 2004. Aircraft Noise Around a Large International Airport and its Impact on General Health and Medication use. *Occupational and Environmental Medicine*, May 01, vol. 61, no. 5, pp. 405-413 DOI 10.1136/oem.2002.005488.

FUJII, K., SAKURAI, M. and ANDO, Y., 2004. Computer Software for Identification of Noise Source and Automatic Noise Measurement. *Journal of Sound and Vibration*, 10/22, vol. 277, no. 3, pp. 573-582.

GENESCÀ, M., ROMEU, J., PÀMIÉS, T. and SÁNCHEZ, A., 2009. Real Time Aircraft Fly-Over Noise Discrimination. *Journal of Sound and Vibration*, 6/5, vol. 323, no. 1-2, pp. 112-129 ISSN 0022-460X. DOI DOI: 10.1016/j.jsv.2008.12.030.

GIBBONS, J. and CHAKRABORTI, S., 2003. Nonparametric Statistical Inference (Statistics: A Series of Textbooks and Monographs), 05/09/ ISSN 0824740521; 0824740521.

GIRVIN, R., 2009. Aircraft Noise-Abatement and Mitigation Strategies. *Journal of Air Transport Management*, 1, vol. 15, no. 1, pp. 14-22 ISSN 0969-6997. DOI DOI: 10.1016/j.jairtraman.2008.09.012.

HHD Software., 2010. *Hex Editor Neo*.

IMAGINE WP2 partners., 2006. *Determination of Lden and Lnight using Measurements*.

International Organization for Standardization. Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology., 2008. *Evaluation of Measurementdata — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

ISO, 2009. ISO 20906:2009. Acoustics -- Unattended Monitoring of Aircraft Sound in the Vicinity of Airports.

ISO., 2007. *ISO 1996-2:2007. Acoustics -- Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise -- Part 2: Determination of Environmental Noise Levels*.

ISO., 2003. *ISO 1996-1:2003. Acoustics -- Description, Measurement and Assessment of Environmental Noise -- Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures*.

ISO., 1997. *ISO/IEC Guide 43-1 :1997. Proficiency Testing by Interlaboratory Comparisons- Part 1: Development and Operation of Proficiency Testing Schemes*.

ISO., 1987.

ISO 1996-3:1987. Acoustics -- Description and Measurement of Environmental Noise -- Part 3: Application to Noise Limits.

5. BIBLIOGRAFÍA

Joaquim, 2007. Applied Statistics using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R, 07/20/ ISSN 3540719717; 3540719717.

Ley., 2003. *Ley 37/2003, De 17 De Noviembre, Del Ruido.*

MAY, M. and HILL, S.B., 2006. Questioning Airport expansion—A Case Study of Canberra International Airport. *Journal of Transport Geography*, 11, vol. 14, no. 6, pp. 437-450 ISSN 0966-6923. DOI DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2005.10.004.

Microsoft., 2007. *Sharepoint Portal Server.*

MORRELL, P. and LU, C.H.-., 2000. Aircraft Noise Social Cost and Charge Mechanisms – a Case Study of Amsterdam Airport Schiphol. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 7, vol. 5, no. 4, pp. 305-320 ISSN 1361-9209. DOI DOI: 10.1016/S1361-9209(99)00035-8.

NERO, G. and BLACK, J.A., 2000. A Critical Examination of an Airport Noise Mitigation Scheme and an Aircraft Noise Charge: The Case of Capacity Expansion and Externalities at Sydney (Kingsford Smith) Airport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 11, vol. 5, no. 6, pp. 433-461 ISSN 1361-9209. DOI DOI: 10.1016/S1361-9209(00)00010-9.

RABAOUI, A., LACHIRI, Z. and ELLOUZE, N., 2004. *Automatic Environmental Noise Recognition.* IEEE, 2004,.

RD., 2007. *Real Decreto 1367/2007, De 19 De Octubre, Por El Que Se Desarrolla La Ley 37/2003, De 17 De Noviembre, Del Ruido, En Lo Referente a Zonificación Acústica, Objetivos De Calidad y Emisiones Acústicas.* .

Statistical Graphics Corp., 2000. *Statgraphics Plus.*

The Mathworks., 2008. *Matlab.*

VAN DER HEIGDEN, J. and VAN DER PLOEG, F., 2001. *Recognition and Quantification of Aircraft Noise Events Inside Dwellings.* , 2001,.

VILAR, J. *Estadística 2.* Available from:
http://dm.udc.es/asignaturas/estadistica2/estadistica_2.htm.

WHO., 1999. *Guidelines for Community Noise.*

ZELNIO, A.M., 2009. *Detection of Small Aircraft using an Acoustic Array.* Wright State University.

6 ANEXOS

6.1 TERMINOLOGÍA REFERENTE A LA EVALUACIÓN DEL RUIDO

Nivel de presión sonora UNE-ISO 1996-1

Diez veces el logaritmo decimal del cuadrado del cociente de una presión sonora cuadrática determinada y la presión acústica de referencia, que se obtiene con una ponderación frecuencia y una ponderación temporal normalizadas.

Nivel de presión sonora máximo UNE-ISO 1996-1

Es el mayor nivel de presión sonora ponderado en frecuencia y ponderado en el tiempo durante un intervalo de tiempo determinado.

Nivel de exposición sonora UNE-ISO 1996-1

Diez veces el logaritmo decimal del cociente de la exposición sonora, E, y la exposición de referencia, E₀, siendo la exposición sonora la integral temporal del cuadrado, variable en el tiempo, de la presión sonora instantánea ponderada en frecuencia sobre un intervalo de tiempo determinado, T, o durante un suceso.

$$L_E = 10 \log \left(\frac{E}{E_0} \right) \text{ dB}$$

$$E = \int_T p^2(t) dt \text{ dB}$$

Donde E₀ es 400 (μPa)²s.

Nivel equivalente UNE-ISO 1996-1; ISO 20906

El nivel de presión sonora continuo equivalente es diez veces el logaritmo decimal del cociente entre el cuadrado de la presión sonora cuadrática media durante un intervalo de tiempo determinado y la presión acústica de referencia, donde la presión sonora se obtiene con una ponderación frecuencial normalizada.

El nivel de presión sonora continuo equivalente ponderado A es

$$L_{AeqT} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right] \text{ dB}$$

Intervalo de referencia UNE-ISO 1996-1

Intervalo de tiempo al que se refiere la evaluación del ruido.

El intervalo de tiempo de referencia se puede especificar en normas nacionales o internacionales o por las autoridades locales para englobar las actividades humanas típicas y las variaciones en el funcionamiento de las fuentes de ruido. Los intervalos de tiempo de referencia pueden ser, por ejemplo, una parte del día, un día entero o una semana completa. Algunos países pueden definir incluso intervalos de referencia más largos.

Se pueden especificar diferentes niveles o conjuntos de niveles para intervalos de referencia diferentes.

Intervalo a largo plazo UNE-ISO 1996-1

Intervalo de tiempo especificado sobre el que se promedia o evalúa el ruido de una serie de intervalos de referencia.

El intervalo de tiempo a largo plazo se determina con objeto de describir el ruido medioambiental y generalmente es fijado por las autoridades responsables.

En el caso de evaluaciones a largo plazo y para el uso del suelo, se deben utilizar intervalos a largo plazo que representen una fracción significativa de un año (por ejemplo, 3 meses, 6 meses, 1 año).

Ruido total UNE-ISO 1996-1; ISO 20906

Ruido global existente en una situación determinada en un momento determinado, generalmente compuesto por ruidos emitidos por varias fuentes, tanto próximas como lejanas.

Ruido específico UNE-ISO 1996-1; ISO 20906

Componente del ruido ambiente que se puede identificar específicamente y que está asociado a una fuente determinada.

En el presente documento se utiliza la denominación $L_{aircraft,D}$ para indicar el nivel equivalente del ruido producido por los aviones en el intervalo de referencia de duración D. Mientras que $L_{aircraft,Daircraft}$ refiere el resultado a la duración del paso de los aviones ($D_{aircraft}$).

Ruido residual UNE-ISO 1996-1; ISO 20906

Ruido ambiente que perdura en un lugar determinado, en una situación determinada cuando se suprimen los ruidos específicos en estudio.

Ruido de fondo frente a ruido residual

En mucha de la documentación consultada se tiende a identificar los conceptos de “ruido residual” y “ruido de fondo”, como refiriéndose a un único concepto. Sin embargo, en este trabajo tiene sentido diferenciarlos, tal y como se argumenta a continuación.

Denominamos ruido de fondo a aquel ruido que se produce de manera simultánea a la medición del ruido específico. La aplicación estricta de esta definición implica que ni el ruido específico ni el ruido de fondo pueden ser medidos con un sonómetro, ya que el micrófono capta ambos a la vez y es incapaz de discriminarlos. Por lo tanto, al paso de los aviones lo que mide el sonómetro realmente no es el ruido específico que estos producen, sino el ruido total, que incluye al ruido de fondo (residual) que se produjo durante el paso del avión.

Por su parte, en este trabajo nos referiremos al ruido residual como aquella parte que no es detectada como ruido de aviones. Por lo tanto, cuando se reporta el indicador de ruido de cada

paso de avión, dicho valor incluirá una cierta aportación procedente del ruido de fondo, ya que este contamina la medida.

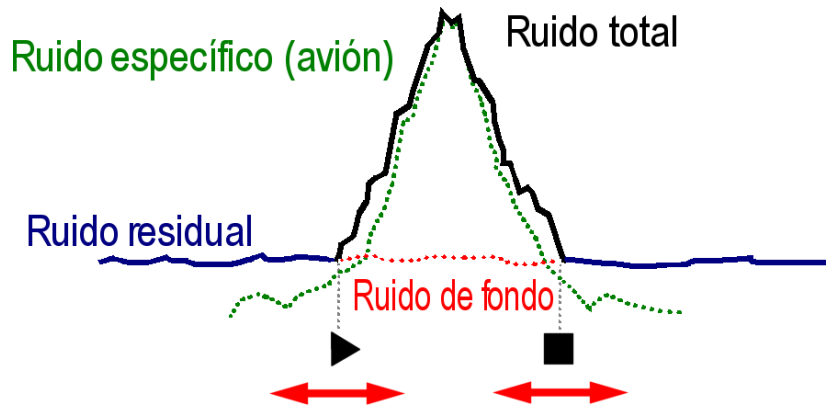


Figura 37. Efecto del ruido de fondo

Cuando se inicia la medida el ruido residual pasa a llamarse ruido de fondo. Dicho ruido de fondo se suma al ruido específico y afecta a la medida efectuada por el sonómetro (ruido total).

Sin embargo, el ruido residual no contaminará la medida, aunque afectará al proceso de detección del evento sonoro, en lo referente a la localización de los instantes de inicio y final del mismo. Por lo tanto, habrá una contribución a la incertidumbre derivada del ruido residual, y una distinta derivada del ruido de fondo.

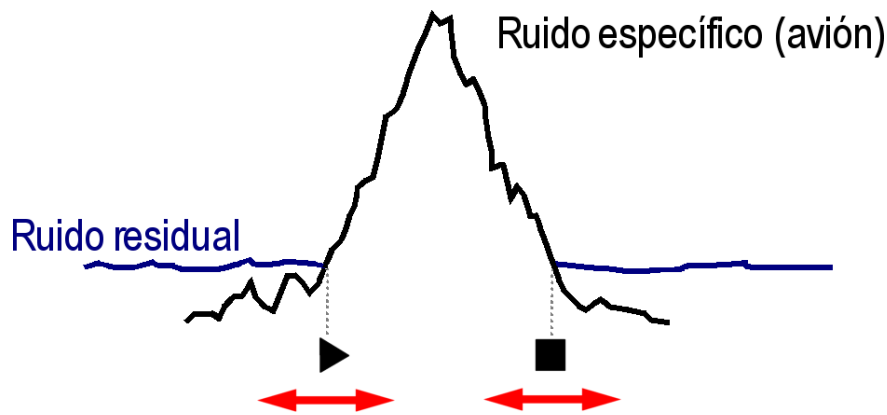


Figura 38. Efecto del ruido residual

Aunque al iniciar la medida se eliminaran el resto de fuentes de ruido (eliminar el ruido de fondo), el ruido residual afectará a los instantes de inicio y finalización del evento detectado, originando incertidumbre en la medida del nivel de exposición del avión.

6.2 CONCEPTOS ESTADÍSTICOS

En este apartado se definen algunos de los conceptos estadísticos que se han empleado y desarrollado en este Trabajo Fin de Máster. La información que se presenta ha sido recopilada de libros de estadística, manuales de ayuda de paquetes informáticos, así como diversos cursos y manuales encontrados en los sitios corporativos de algunas universidades (The Mathworks 2008, Statistical Graphics Corp. 2000, Vilar, Diaz, Gibbons et al. 2003, Joaquim 2007).

Medidas de centro

Media: La media es una medida de la tendencia central de una distribución. Existen distintos tipos de media, media aritmética, media geométrica, media ponderada...

En concreto la media aritmética se define:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Ec 11}$$

Moda: La moda es el valor con mayor frecuencia en una distribución de datos.

Mediana: Sobre una serie de datos ordenada, la mediana es el valor que deja el mismo número de datos por encima y por debajo de él.

Teorema del límite central.

Si X_1, X_2, \dots, X_n , son variables aleatorias independientes, con idéntico modelo de probabilidad, de valor medio μ y varianza σ^2 , entonces la distribución de la variable

$$Z = \frac{(\sum_{i=1}^n X_i) - n\mu}{\sigma\sqrt{n}} \quad \text{Ec 12}$$

Se aproxima a la de una variable normal estándar $N(0,1)$, mejorándose la calidad de la aproximación a medida que n aumenta.

Con carácter general, o al menos en los modelos de probabilidad clásicos, suele admitirse como una aproximación aceptable al modelo normal cuando intervienen en el sumatorio 30 variables aleatorias independientes.

Desigualdad de Tchebycheff

La desigualdad de Tchebycheff permite ofrecer una cota inferior a la probabilidad de que el valor de una variable aleatoria con varianza finita esté a una cierta distancia de su esperanza matemática. Su formulación es la siguiente:

Si X es una variable aleatoria de media μ y varianza σ^2 , entonces, para todo número real $k > 0$ se cumple que

$$P(|X - \mu| > k\sigma) \leq \frac{1}{k^2} \quad \text{Ec 13}$$

Esta desigualdad permitiría esbozar un intervalo de confianza para una distribución sin ningún tipo de restricciones. En el caso de pretender un nivel de confianza del 95%

$$P(|X - \mu| > k\sigma) \leq \frac{1}{k^2} = 0.05 \Rightarrow k = 4.47 \quad \text{Ec 14}$$

Con lo que el intervalo de confianza sería $[\mu - 4.47\sigma; \mu + 4.47\sigma]$

Intervalos de confianza vs intervalos de credibilidad

El intervalo de credibilidad delimita un margen en el que se distribuye un porcentaje de la población. El intervalo de credibilidad del 95% para una población se calcula tomando los valores centrales (alrededor de la moda) que engloban una probabilidad del 95% de la distribución poblacional, por lo habrá una tendencia a que sólo un 5% de las muestras seleccionadas de la población queden fuera de dicho intervalo.

Por otra parte, el intervalo de confianza se utiliza para determinar el grado de fiabilidad cuando se estima un valor estadístico (por ejemplo la medida). Si para estimar la media de una población obtenemos una muestra de M determinaciones, y calculamos el promedio, obtendremos una estimación de la media poblacional que será distinta para cada muestra que vayamos sacando. Si obtuviéramos N muestras, todas del mismo tamaño M, y para cada una de ellas calculáramos la media. La media muestral se distribuiría entorno a un intervalo de confianza. Al fijar el nivel de confianza r, podemos establecer un intervalo de confianza para el estadístico determinado (la media), de tal manera que sólo un (100-r) % de los promedios calculados (para las N muestras) quedarían fuera del intervalo de confianza.

El intervalo de credibilidad corresponde a la traducción de los siguientes términos recogidos en el GUM: “coverage interval”, también denominado “credible interval” o “bayesian interval”.

Estadística paramétrica y no paramétrica

La estadística paramétrica es una rama de la estadística que estudia los datos asumiéndolos como procedentes de modelos estadísticos conocidos y parametrizables. Los métodos y procedimientos que se utilizan en acústica paramétrica han sido ampliamente estudiados y permiten obtener conclusiones consistentes y robustas en la medida que se cumplan las restricciones que dichos métodos exigen. Los datos observados permiten estimar parámetros de entrada a los modelos, y a partir de este punto se trabaja con los modelos.

Por ejemplo, el análisis de la varianza (ANOVA) es un método paramétrico muy potente que permite realizar contrastes con respecto a múltiples factores, incluso analizando la interacción entre ellos. Sin embargo, este método exige el cumplimiento de unos requisitos de

normalidad, homocedasticidad e independencia, que no siempre pueden ser asumidos para los datos analizados (es el caso de los datos tratados en este trabajo).

La estadística no paramétrica estudia las pruebas y modelos estadísticos cuya distribución no puede ser definida a priori. Los métodos no paramétricos exigen menos restricciones sobre los datos, por lo que pueden ser aplicados de manera más amplia. Por el contrario, los métodos son menos robustos, por lo que siempre que sea posible resulta preferible realizar transformaciones en los datos que permitan aplicar enfoques paramétricos.

Algunas de las pruebas no paramétricas que se han utilizado en este trabajo son el test de Kruskal-Wallis y el test de Lavene.

Test de Kruskal-Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis es un método no paramétrico que pretende probar si un grupo de datos pertenece a una misma población, y por lo tanto procede de una misma distribución. Su equivalente paramétrico sería el método ANOVA, pero, a diferencia de este, no se asume normalidad en los datos. Sí se asume, bajo la hipótesis nula, que los datos proceden de la misma distribución, lo que lleva asociado entre otros el requisito de homocedasticidad (si la forma y varianza de las distribuciones difieren, los resultados del test podría verse comprometidos).

$$H_0: \theta_1 = \theta_2 = \dots \theta_k$$

$$H_1: \text{Al menos } \theta_j \text{ difiere}$$

En primer lugar hay que ordenar todos los datos en forma ascendente, para poder asignar los rangos a cada dato ordenado. Posteriormente hay que recolocar los rangos (no los datos) conforme al orden original de los datos. En el caso de que los datos procedan de una misma distribución, el orden de los rangos será aleatorio, y por lo tanto la densidad de los rangos será uniforme a lo largo de la serie y entre los k grupos comparados. Esta comprobación se realiza en base al siguiente estadístico:

$$W = \left[\frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} \right] - 3(N+1) \quad \text{Ec 15}$$

El valor resultante se utiliza para calcular el p-valor, que determinará la probabilidad de que los conjuntos de datos procedan de una misma distribución.

Test de Lavene

En inferencia, el test de Lavene se utiliza para evaluar si un conjunto de muestras tienen la misma varianza, es decir, para chequear la homogeneidad de varianzas. Para ello se realiza un contraste hipótesis en el que la hipótesis nula asume la igualdad de las varianzas. Cuando el p-valor resultante del test de Lavene es menor que el nivel de significación seleccionado (p.ej. 0.05), debe asumirse que las diferencias observadas sobre la varianza de las muestras no son provocadas únicamente por la aleatoriedad de la muestra, con lo que se rechaza la hipótesis nula, concluyendo que existen diferencias significativas de la varianza. El test de Lavene es menos sensible a la falta de normalidad que otros, como el test de Bartlett, por lo que ha sido utilizado a lo largo de este trabajo.

El test de Lavene se define de la siguiente manera:

$$H_0: \sigma_1 = \dots = \sigma_k ; \quad H_1: \sigma_i \neq \sigma_j \text{ al menos para un par } (i, j) \quad \text{Ec 16}$$

Dada una variable Y, se extrae una muestra de tamaño N y se divide en k grupos, donde N_i es el número de muestras en el i-ésimo subgrupo, el estadístico de la prueba se define como sigue:

$$W = \frac{(N - k) \sum_{i=1}^k N_i (Z_i - Z_{..})^2}{(k - 1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - Z_i)^2} \quad \text{Ec 17}$$

Dicho estadístico es utilizado para obtener el p-valor resultante del test.

La interacción entre factores

Se dice que no existe interacción entre dos factores cuando sus efectos sobre la respuesta son aditivos. Esto implica que la diferencia entre las respuestas medias de dos niveles cualesquiera de un factor permanece constante para todos los niveles del otro factor, y viceversa.

El gráfico de interacción permite ilustrar la existencia de interacción. Para construirlo se marcan en el eje de abscisas los niveles i de uno de los factores implicados y en ordenadas los niveles j del otro factor implicado. Se dibujan un gráfico correspondiente a las medias obtenidas para cada par de niveles ij, y se unen con líneas los valores correspondientes a cada nivel j.

Cuando no existe interacción, las líneas obtenidas tenderán a ser paralelas (figura 39a), mientras que cuando existe interacción esto no sucede, dado que cada combinación de niveles lleva asociado un incremento diferente de las medias (figura 39b).

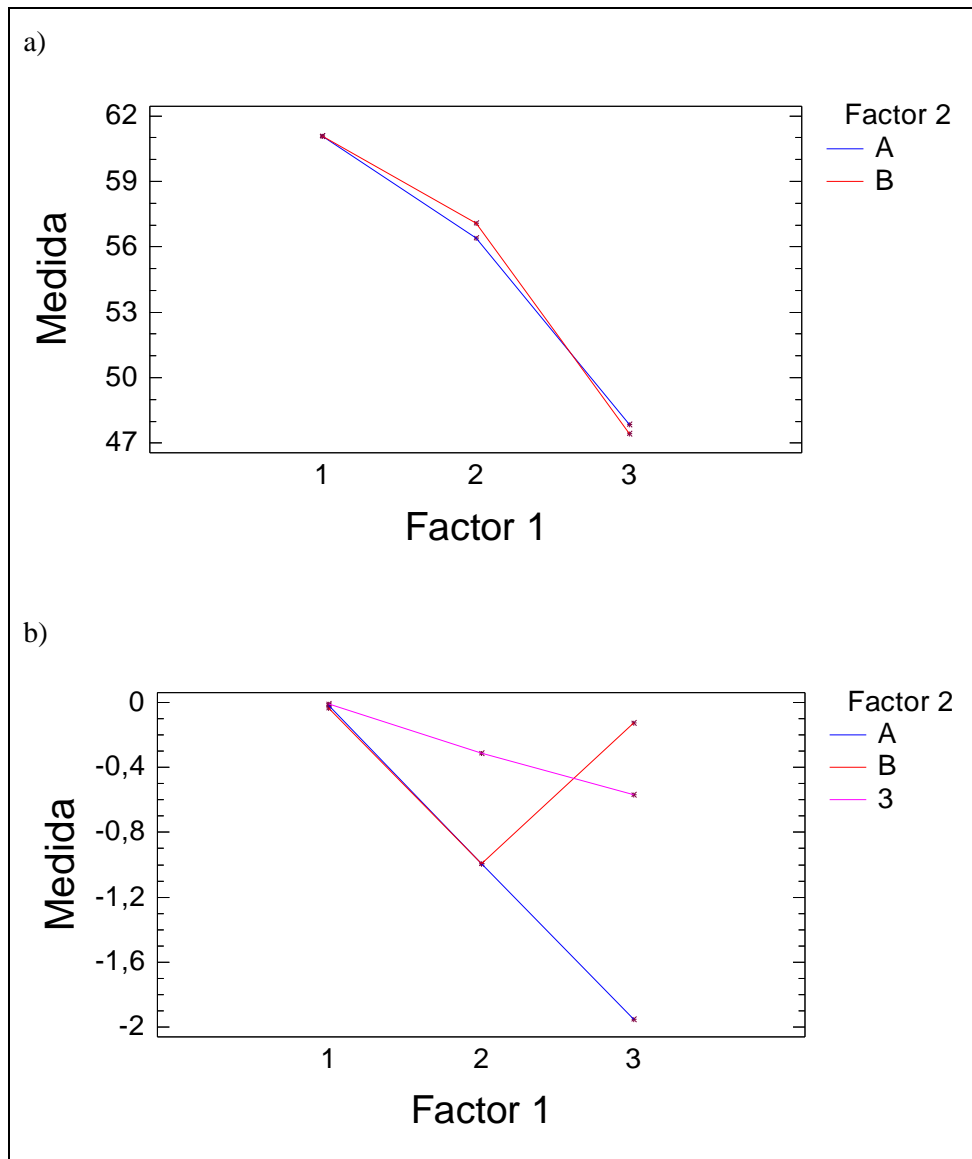


Figura 39. Gráficos de interacción

En el caso a, puede asumirse que no existe interacción entre los factores, sin embargo, en el caso b la interacción resulta evidente, ya que las líneas distan mucho de discurrir en paralelo.