



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---



**FACULTAD DE MEDICINA  
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**

**Viabilidad operativa de audio-análisis  
en teléfonos celulares para localizar a  
un tirador de arma de fuego**

**Facultad de Medicina**



**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
CIENCIA FORENSE**

**P R E S E N T A:  
ELIZABETH TELLEZ CERVANTES**



**CIENCIA  
FORENSE**  
U N A M

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. VICENTE TORRES ZÚÑIGA  
2019**

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Wolf Luis Mochán Backal

**Vocal:** Lic. Roberto Carlos Hernandez Corona

**Secretario:** Dr. Vicente Torres Zúñiga

**1er. Suplente:** Dr. Roberto Velasco Segura

**2do. Suplente:** Mtro. Francisco Javier Piliado Velasco

**LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:**

Licenciatura en Ciencia Forense, UNAM, Ciudad Universitaria

**TUTOR DE TESIS:**

Dr. Vicente Torres Zúñiga

---

# Agradecimientos

Al Dr. Vicente Torres Zúñiga, por haberme aceptado como su alumna tesista y también por haber aceptado este tema de tesis y ayudarme a delimitarlo. Por haberme enseñado un poquito de programación en *Octave*, y sobre todo por su paciencia. Creo que no fue nada fácil tener que explicarme y repetirme las cosas cuando veía mi cara de no comprender lo que estaba tratando de decir. Por sus comentarios a veces algo duros y que me hicieron algunas veces sufrir. Por haber tolerado todos mis enojos, mis dramas y mis lágrimas. Por confiar en que podía hacer las cosas, a pesar de que no tenía los conocimientos sólidos en física o en ingeniería. Siempre se preocupó por todo: ¿como te fue en el examen de inglés?, ¿como van las cosas?, etc. Gracias por su apoyo.

Al Mtro. José Guadalupe Bañuelos Muñeton por su colaboración en la revisión técnica de este proyecto de tesis, sus comentarios y observaciones fueron muy importantes y fundamentales para poder avanzar. También, le agradezco mucho sus consejos que me ayudaron a tener mayor seguridad en mi tesis y. Además, por considerarme dentro del proyecto papime.

Al Dr. Roberto Velasco Segura, por su tiempo de revisión de este trabajo, en sus dieciocho hojas de comentarios y observaciones. También por haberme facilitado el ingreso a la Cámara Anecoica del ICAT- UNAM, lugar en donde pude realizar algunas de las mediciones plasmadas en esta tesis. Por el recorrido en el laboratorio de acústica, en donde me mostró las diferentes cámaras del ICAT: anecoica, de transmisión y reverberación. Fue una experiencia agradable, sobre todo el realizar mi experimentación en la cámara anecoica.

Al Lic. Roberto Carlos Hernández Corona, por sus aportaciones y observaciones realizadas a este trabajo, fueron muy enriquecedoras. Además, por mostrar interés sobre mi tema tesis.

Al Mtro. Francisco Javier Paliado Velasco, por haber aceptado formar parte de mi jurado. Creo que mostró bastante interés sobre mi tesis que incluso entró a una mesa redonda sobre un tema de acústica. Gracias también por las observaciones que realizo a mi escrito.

Al Dr. Wolf Luis Mochán Backal, por sus comentarios y críticas sobre mi trabajo. Enriquecieron bastante este escrito. Gracias por el tiempo que me brindo, a pesar de ser una persona con bastantes ocupaciones y proyectos.

A mi familia, a mis padres Crisanta y Rodrigo, y a mis hermanos: Paola, Edith y Fernando por su apoyo incondicional. Siempre han estado conmigo dándome ánimos en los momentos en lo que parecía que ya no podía o quería rendirme. Por apoyarme al largo de la carrera y sobre todo por creer en mí.

A mis compañeros: Samara Cárdenas y Pablo Alejos por haberme apoyado en las mediciones que realizamos en la Unidad Canina C. U.. Incluyo también a los chicos del IPN:

Julián y Roberto, quienes también ayudaron con sus teléfonos celulares. Gracias por su tiempo que me brindaron.

A todas los compañeros y amigos incondicionales de la carrera que en algún me daban ánimos para seguir continuando. Por los buenos chismes y por hacer más ameno este proceso de la carrera. En especial, a mi amiga Susana Aviña, los años más difíciles de la carrera también fueron los más divertidos.

A todas esas personas que estuvieron en mi vida, brindándome su apoyo y dandome consejos. Sin ellos yo no estaría hasta donde estoy ahora.

Y finalmente, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Licenciatura en Ciencia Forense por brindarme los conocimientos y habilidades en sus aulas.

Este trabajo ha recibido el apoyo económico de una entidad pública, la Universidad Nacional Autónoma de México, mediante los proyectos: **UNAM-PAPIME-PE107216** y **UNAM-PAPIME-PE115519** carece de conflicto de intereses.

# Resumen

Esta tesis de licenciatura consiste en un análisis primario –desde la perspectiva empírica y teórica– de una señal acústica registrada en varias unidades *smartphone*, con el fin de localizar la posición relativa dónde se activó un arma de fuego. Se ha procurado que el escenario de investigación sea similar al que pueda presentarse ante un suceso de interés forense, pues la intención de este texto es que sea de utilidad a los peritos interesados.

## **Estructura de la obra**

Esta obra cuenta con cuatro capítulos. En el primer capítulo se presenta el contexto de investigación. Demostramos, mediante cifras oficiales, el incremento del uso de armas de fuego en la Ciudad de México en la comisión de delitos, de modo que en la perspectiva forense es importante determinar la distancia y localización entre el tirador y el objetivo. En otras palabras, mostramos la importancia de este trabajo de investigación. Después, hacemos una revisión sobre conceptos fundamentales de balística, como la clasificación de armas de fuego. También realizamos una breve descripción de la literatura relacionada con la estimación de la distancia entre el tirador y su objetivo mediante observación de efectos físicos, análisis químicos y acústicos.

En el capítulo segundo revisamos el marco teórico empleado en la tesis. Sucintamente exponemos las características y conceptos de fenómenos ondulatorios. Por ejemplo, explicamos la esencia de la transformada de Fourier. Además realizamos una descripción breve de varias representaciones gráficas de una señal dependiente de la temperatura. Con estos elementos, explicamos la acústica del disparo de una arma de fuego. Después, el documento expone los fundamentos de los dispositivos móviles, en particular los llamados teléfonos-inteligentes. De estos aparatos estamos interesados en el análisis forense que permite obtener su geolocalización.

En el capítulo tercero se explica a detalle los métodos, materiales y resultados obtenidos. La fabricación de dos prototipos de cajas acústicas portátiles y económicas, que tienen el propósito de caracterizar la respuesta de los micrófonos de los celulares en función de la frecuencia e intensidad de una señal sónica. Los resultados obtenidos se convalidaron con mediciones realizadas en una cámara anecoica. Más adelante, se muestra cómo se realizaron las mediciones de señales impulsivas –como las que genera el disparo de un arma de fuego– en dos espacios: cerrado y abierto.

Por último, realizamos la estimación de la posición de la fuente de sonido a través del método diferencia de tiempo de arribo, señalando las ventajas y limitaciones que se presentaron.

En los apéndices documentamos los códigos fuente de rutinas realizadas, una propuesta de acción forense para coordinar a los peritos en esta particular clase de investigación y hacemos una breve exposición sobre la importancia de uso ciudadano de datos abiertos.

Finalmente, en el capítulo cuarto se expone las conclusiones y prospectiva de este trabajo de investigación.

# Puntos destacables del trabajo

Deseo destacar tres resultados obtenidos en esta tesis:

- 1) La conveniencia de construir una caja acústica portátil y económica con el fin de caracterizar la respuesta acústica de celulares.
- 2) Evidenciar la factibilidad forense de localizar a un tirador de arma de fuego mediante el estudio de la señal acústica registrada en diferentes teléfonos celulares.
- 3) Después de realizar un análisis de las variables más importantes, en esta tesis propongo una ruta de trabajo que puede ser útil para coordinar el trabajo de diferentes especialistas forenses.

## **Palabras clave**

**1) Acústica forense, 2) Armas de fuego, 3) Análisis teórico-experimental, 4) Criminalística.**

# Índice General

<b>CAPÍTULO 1: CONTEXTO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>11</b>
1.1 Antecedentes	11
1.2 Tipos de armas de fuego	14
1.3 Balística de efectos y estimación de la distancia tirador-objetivo	17
1.4 Estimación distancia por análisis de residuos de disparo	19
1.5 Determinación de distancia por medios acústicos	20
1.6 Resolución de caso a través de la acústica forense	22
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1 Fundamentos de fenómenos ondulatorios	23
2.2 Transformada de Fourier	27
2.2.1 Gráficos representativos de señales temporales	29
2.3 ¿Qué es el sonido?	29
2.3.1 Velocidad de propagación	30
2.3.2 Fenómenos de propagación del sonido	33
2.3.3 Fenómenos acústicos relacionados con la propagación de sonido	33
2.4 Acústica del disparo de arma de fuego	34
2.5 Localización de tirador mediante la medición tiempo de retardo	36
2.6 Geolocalización de teléfonos celulares y extracción de su información	41
<b>CAPÍTULO 3: MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS</b>	<b>44</b>
3.1 Mediciones de impulsos sonoros	44
3.1.1 Propuesta experimental	44
3.1.2 Resultados parciales	47
3.2 Construcción de sistema portátil de caracterización acústica para dispositivos de audio-grabación	49
3.2.1 Resultados de la primera caja	53
3.3 Calibración mediante impulsos sonoros	63
3.3.1 Mediciones en la segunda caja	63
3.3.2 Calibración mediante impulsos sonoros en cámara anecoica	65
3.3.3 Conclusiones parciales	68
3.4 TDOA (Diferencia de Tiempo de Arribo) en lugar abierto	70
3.4.1 Descripción del lugar	70
3.4.2 Procedimiento	71
3.4.1 Resultados	73
<b>CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA</b>	<b>82</b>
4.1 Conclusiones principales	82
4.2 Prospectiva de la investigación	83
4.3 Palabras finales	84

<b>APÉNDICES</b>	<b>85</b>
APÉNDICE A: Líneas de ruta para realizar la localización de un tirador a partir de celulares	86
APÉNDICE B: Datos abiertos y datos forenses (el problema de la obtención de información en periciales)	88
APÉNDICE C: Códigos de Octave programados	89
APÉNDICE D: Resultados obtenidos de la calibración de teléfonos celulares	95
APÉNDICE E: Foros en los que se presentó el proyecto.	97
APÉNDICE F: Fichas técnicas de los materiales empleados para la construcción de la segunda caja de caracterización.	101
APÉNDICE G: Resultados en lugar cerrado	103
APÉNDICE H: Esquema de caja mejorada.	105
APÉNDICE I. Solicitud para llevar a cabo la parte experimental	106
APÉNDICE J. Resultados de las mediciones en campo abierto	107
APÉNDICE K: Modelo de hipérbolas (Campo cercano)	111
<b>REFERENCIAS</b>	<b>113</b>

# Índice de figuras

Figura 1. Mecanismos de homicidio en países de América (2012).....	11
Figura 2. Denuncias presentadas ante el Ministerio Público.....	12
Figura 3. Homicidios dolosos con arma de fuego del Observatorio Ciudadano.....	13
Figura 4. Gráficos de algunos tipos de armas de fuego.....	16
Figura 5. Representa la sumatoria de los valores de amplitud .....	23
Figura 6. Esquemas que representan ondas senoidales.....	24
Figura 7. Esquemas que representan: superposición constructiva y destructiva.....	26
Figura 8. Gráfica de onda cuadrada .....	27
Figura 9. Variación de la velocidad del sonido en función de la temperatura.....	31
Figura 10. Onda expansiva de arma de fuego.....	35
Figura 11. Oscilograma que representa los fenómenos acústicos de disparo.....	36
Figura 12. Esquema del tiempo de retardo de señales entre dos micrófonos.....	37
Figura 13. Esquema que representa intersección de curvas para ubicar fuente.....	39
Figura 14. Croquis de la sede de la Licenciatura en Ciencia Forense.....	44
Figura 15. Esquema que representa la colocación en fila de los alumnos.....	45
Figura 16. Esquema que representa la ubicación de los 36 alumnos en aula digital.....	46
Figura 17. Gráfica que representa los niveles de intensidad en función de la distancia.....	47
Figura 18. Niveles de intensidad relativa en escala logarítmica en espacio abierto.....	48
Figura 19. Caja acústica utilizando una caja de cartón.....	50
Figura 20. Fotografía de la segunda caja acústica.....	51
Figura 21. Ventana del programa “ <i>Two channels frequency generator</i> ”.....	52
Figura 22. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 250 Hz.....	53
Figura 23. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 2 KHz.....	54
Figura 24. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 20 KHz.....	55
Figura 25. Gráficos de respuesta de 7 KHz.....	56
Figura 26. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 250 Hz.....	57
Figura 27. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 2,000 Hz.....	58
Figura 28. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 20 KHz.....	59
Figura 29. Gráficos de respuesta del sensor a una frecuencia de 7 KHz.....	60
Figura 30. Oscilogramas a través del programa <i>Audacity</i> .....	62
Figura 31. Gráfica que representa el incremento en la intensidad.....	63
Figura 32. Fotografía de la cámara anecoica ICAT-UNAM.....	65
Figura 33. Señales generadas en la cámara anecoica.....	66
Figura 34. Niveles de intensidad de entrada registrados en interior de cámara anecoica.....	67
Figura 35. Fotografía del lugar en donde se realizó la medición.....	69
Figura 36. Fotografía de la colocación del cohete en el soporte de madera.....	70
Figura 37. Esquema que representa la colocación de los dispositivos móviles y el cohete.....	71
Figura 38. Esquema que representa resultados con n° de sensores.....	73
Figura 39. Esquema que representa los 7 dispositivos móviles y resultados a obtener.....	73
Figura 40. Esquema que representa dos audios sin sincronizar.....	75
Figura 41. Esquema que representa la sincronización entre dos audios.....	75
Figura 42. Gráfica que representa los tiempos de arribo de cada sensor.....	76
Figura 43. Esquema de posibles direcciones en función de la distancia.....	77
Figura 44. Esquema de posibles direcciones en función del tiempo.....	79

# Índice de Cuadros

Tabla 1. Valores de la temperatura y la velocidad del sonido.....	31
Tabla 2. Comparación de las incertidumbres en segunda caja y cámara anecoica.....	68
Tabla D1. Valores de intensidad de entrada y salida en la segunda caja.....	94
Tabla D2. Valores de intensidad de entrada y salida en la cámara anecoica.....	95
Tabla K1 Registro de la posición GPS y UTM de los dispositivos móviles.....	106
Tabla K2. Registro de las temperaturas para cada detonación.....	107
Tabla K3. Distancia del sensor a la fuente de sonido y tiempos de arribo.....	108
Tabla K4. Resultados de las posibles direccionalidades de la fuente de sonido.....	109

# CAPÍTULO 1: CONTEXTO DE INVESTIGACIÓN

## 1.1 Antecedentes

En México, el uso de algunas armas de fuego constituye un delito, sancionado por los códigos penales estatales, el código penal federal [1], así como, la Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos [2].

De acuerdo con la Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC), en el “Estudio Mundial sobre el Homicidio 2013”, la disponibilidad de un arma es uno de los factores “transversales externos” que puede facilitar un homicidio. De hecho, en el continente americano, el uso de armas de fuego es particularmente predominante, pues dos de las terceras partes de los homicidios se cometen con estas [3].

Como muestra la Fig.1, más de la mitad de los homicidios reportados fueron cometidos utilizando un arma de fuego. La diferencia es significativa respecto a los demás mecanismos empleados. Si bien, la información es del 2012, el porcentaje de armas de fuego involucradas en un homicidio es tan grande que incluso una variación significativa (en mi opinión) sería insuficiente para relegar la cifra por debajo del 50%.

En México, de acuerdo a información reportada por el Sistema Nacional de Seguridad Pública (SESNSP), en el 2015 la cifra de denuncias realizadas ante el Ministerio Público por homicidios dolosos fue de 16,909, de estos 9,531 fueron cometidos empleando un arma de fuego [4]. Es decir, más de la mitad del total, ocupando un porcentaje del 56.3%.

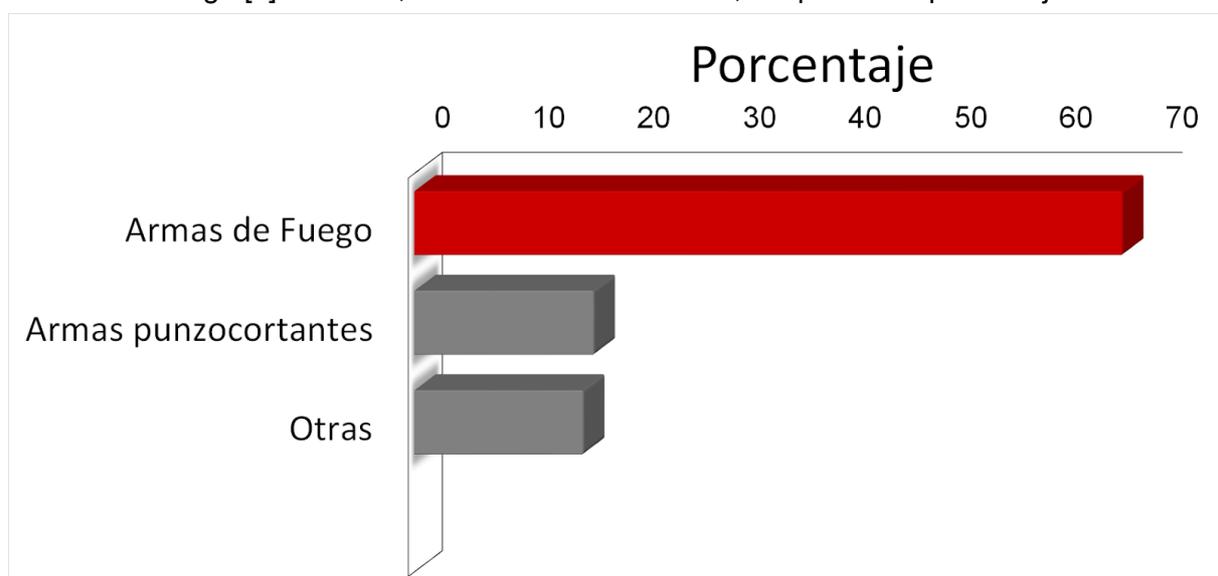


Figura 1. Mecanismos de homicidio en 36 países de América (2012). Basada en la información reportada por UNODC [3]

Para el 2016, el porcentaje de este tipo de delitos aumentó a un 61.3%, siendo que, 12,603 homicidios dolosos fueron cometidos bajo la modalidad de arma de fuego, respecto a un total de 20,547 [5]. Finalmente, en el 2017 se reporta que, de 25,310 casos dolosos, 16,894 fueron cometidos por arma de fuego, en consecuencia el porcentaje aumentó a un 66.7% [6].

Como se aprecia en la Fig. 2, la diferencia es significativa, cada año este tipo de delitos se ha incrementado, a diferencia del resto de los mecanismos, en los que se observa tendencia a disminuir, por lo que podemos afirmar que las armas de fuego son el instrumento más utilizado.

El Observatorio Nacional Ciudadano, una organización de la sociedad civil, ha revisado los datos reportados por el SESNSP, por lo que las cifras respecto a la incidencia de este tipo de delitos a nivel nacional son los mismos en los reportes de incidencia de delitos de alto impacto en México entre 2015 y 2017 [7]. Así, el dato se respalda.

En la Ciudad de México, es a partir del segundo trimestre del 2016, que el porcentaje de este subtipo de homicidios sobrepasó el 60%, porcentaje ha aumentado en el tiempo, en el tercer trimestre del 2017, llegó a un 77%, porcentaje más alto reportado por el Observatorio Ciudadano. El informe actual, correspondiente al segundo trimestre del 2018 indica que, el 70% de los homicidios dolosos fueron cometidos con un arma de fuego [8], en tan solo dos años la incidencia de este tipo de homicidios ha crecido y se ha mantenido por arriba del 60%. Ver gráfica de la Fig.3.

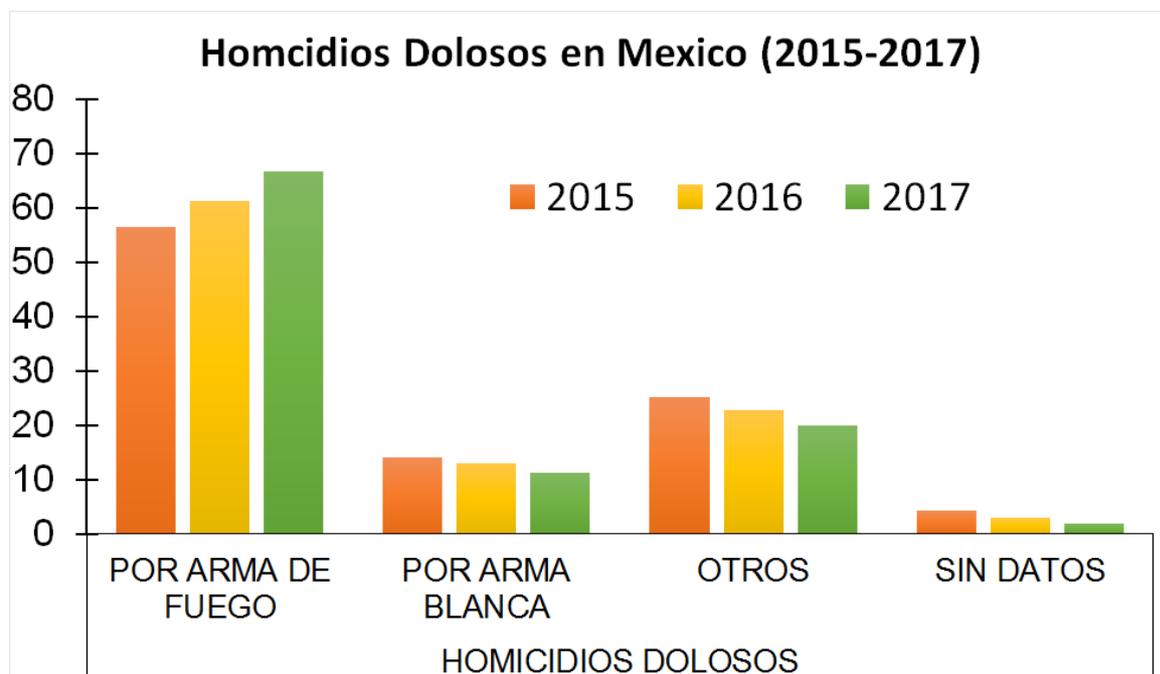


Figura 2. Denuncias presentadas ante el Ministerio Público por homicidios dolosos en México (2015-2017), información basada en los reportes del Sistema Nacional de Seguridad Pública [5].

Como se observa en las Fig. 1, 2, y 3, existe una relación directa entre el uso de armas de fuego y los homicidios dolosos. Sin duda, las armas de fuego, aunque no todos los casos las involucran, desempeñan un papel significativo en el aumento del número de homicidios. Desafortunadamente, la percepción general es que la mayoría de estos casos carecen de investigación adecuada y que la falta de señalar a un responsable implica impunidad.

Entonces, establecemos que el estudio forense en donde está involucrada un arma de fuego es relevante. ¿Qué se debe estudiar al respecto? Por ejemplo, determinar la procedencia y características de los elementos balísticos y arma, las características de las heridas efecto del disparo, entre otras cuestiones. En particular, en la reconstrucción de investigaciones criminales se requiere la ubicación relativa de los tiradores respecto a las superficies impactadas.

En el ámbito civil, la ubicación víctima-tirador nos permite saber si el disparo se realizó a una corta, mediana o larga distancia, posibilitando determinar si se trata de un suicidio, un accidente o un homicidio<sup>1</sup>.

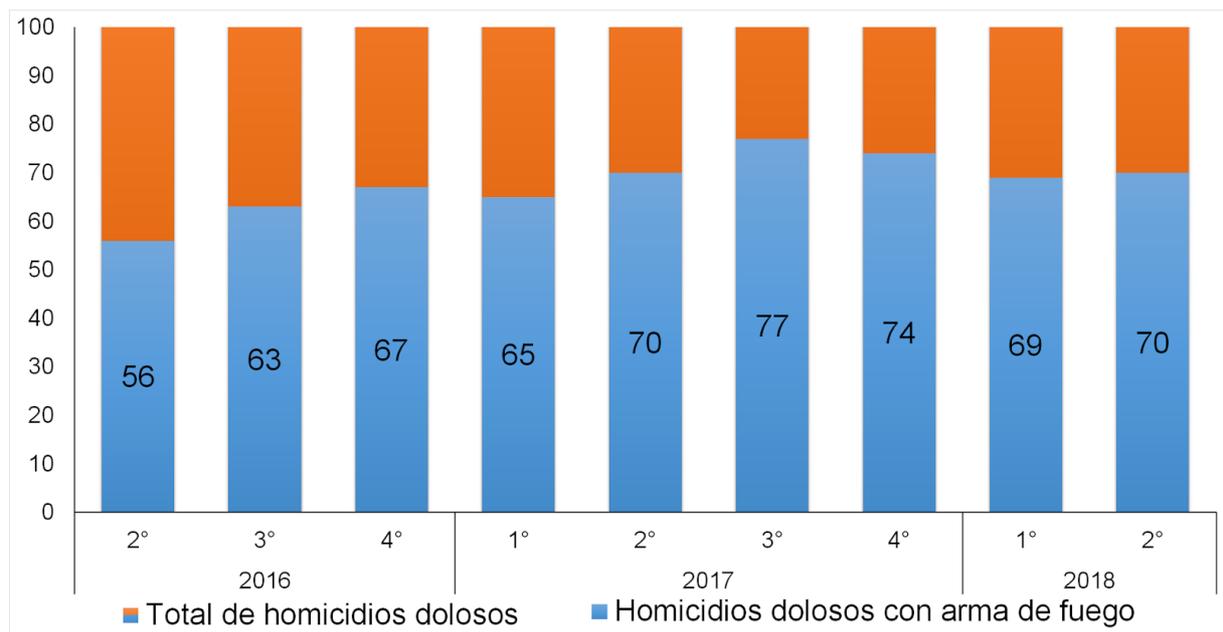


Figura 3. Homicidios dolosos cometidos con arma de fuego, imagen basada en el Observatorio Ciudadano [8].

<sup>1</sup> Ahora bien, en otro contexto, en el ámbito militar (más que para resolver un caso forense) se requiere esta ubicación relativa por razones de inteligencia; es decir, cómo proceder durante un enfrentamiento. En muchos combates armados los disparos se realizan a una amplia distancia, en campos abiertos y con armas de alta precisión, dificultando la ubicación del enemigo; esto puede suceder tanto en una guerra declarada, tácticas de guerrilla o bien cuando elementos del ejército se enfrenta a grupos del crimen organizado.

En situaciones donde se encuentra una multitud de personas, por ejemplo, la presentación de una personalidad y, en ese momento se comete un atentado contra ésta por parte de un francotirador escondido en un lugar oculto. La gente entrara en pánico sin saber quién fue el responsable del acto. Es entonces, cuando las autoridades deben actuar inmediatamente. Para lograr localizar al tirador se espera que estos cuenten con los medios que permitan determinar la ubicación del tirador y así poder resguardar a las personas que se encuentran en un alto en riesgo. Lamentablemente, este tipo de casos ha sucedido en más de una ocasión [9,10].

Del mismo modo, sería de gran utilidad en homicidios cometidos por riña en donde dos grupos contrarios se enfrentan culminando con la privación de la vida de una o más personas bajo el mecanismo del disparo de un arma de fuego [11]. Otros casos son los famosas “balas perdidas”, en las que se desconoce prácticamente el origen del proyectil que ha impactado sobre el cuerpo de una persona, quedando lesionada o privada de la vida a consecuencia de un disparo de arma de fuego del cual se desconoce su ubicación [12,13].

En fin, son múltiples los casos que se podrían citar en los que sería necesario conocer el origen del disparo. Saber este dato podría ayudar a resguardar la seguridad de múltiples personas; o bien, posterior al hecho, lograr determinar la ubicación de la persona que realizó la detonación del arma y así, deslindar responsabilidades.

Alcanzar esta meta requiere de una buen procesamiento criminalístico, por consiguiente es importante la correcta preservación y manejo del lugar de los hechos, siendo relevante para el esclarecimiento del hecho, delimitar las posibles direcciones o ubicaciones desde donde se realizó el disparo y, por ende, descartar otras posibles conjeturas [14].

## 1.2 Tipos de armas de fuego

En el mercado, existe una gran variedad de armas de fuego en diseño, funcionamiento y tipo. Aquí, un arma de fuego la definimos como: un instrumento mecánico conformado por al menos un cañón, a través del cual uno o más proyectiles salen expulsados a altas velocidades, aprovechando la alta presión de los gases, producto de la combustión del propelente. Dicho artefacto ha sido diseñado previamente o puede transformarse para tal fin [15,16].

Con base a la definición, se incluyen en la clasificación de armas de fuego aquellas que son de diseño industrial, así como a las armas de fabricación artesanal, cuya fabricación se realiza a partir de piezas nuevas, o bien, las piezas originales son modificadas con la finalidad de generar un mayor alcance en el disparo o posibilitar el empleo de otro tipo de cartuchos diferentes al diseño del original. También se incluyen dentro de esta clasificación las armas disimuladas como: bolígrafos, cigarrillos, teléfonos móviles, entre otras [17].

Por otro lado, las armas de fuego, de acuerdo a su funcionamiento pueden clasificarse como:

- A) De repetición:** el ciclo de carga y descarga se ejecuta mecánicamente mediante la acción del tirador, operación que se puede repetir hasta agotar el contenido del cargador.
- B) Semiautomática:** En este tipo de armas es necesario oprimir el disparador para cada disparo. Después de cada disparo se recarga automáticamente, es decir, el cartucho se coloca automáticamente en el cañón después de cada disparo.
- C) Automática:** en este tipo de arma se produce una cadena de disparos continuos, una vez iniciada, no se interrumpe en tanto se mantenga oprimido el disparador hasta que el tirador libera la misma o se agoten los cartuchos del cargador.

Además, por su tipo, las armas de fuego se han clasificado en dos tipos:

#### **Armas Cortas:**

- a) Pistola:** arma de fuego corta que puede ser automática o semiautomática, utiliza un cargador, tiene carro corredera y la recámara está alineada con el cañón.
- b) Revólver:** es un arma de fuego corta con sistema de repetición, se distingue por poseer un cilindro o barril giratorio con varias recámaras que giran sucesivamente, en esta se colocan las municiones.

#### **Armas Largas:**

- c) Escopeta:** Arma cuyo cañón generalmente no se encuentra estriado.
- d) Fusil:** es un arma de fuego portátil, que consiste en un cañón de hierro montado sobre una culata de madera y dotado de un mecanismo de disparo.
- e) Rifle:** El término rifle puede usarse indistintamente con el de fusil para describir armas largas de cañón rayado, es indiferente entre ambos conceptos. Las características principales de un rifle son su alta precisión y potencia. Pueden tener un mecanismo de funcionamiento de repetición, automático o semiautomático pues cuentan con un selector de cadencia.
- f) Carabina:** Es un arma de fuego de peso ligero y de longitud menor respecto al fusil o rifle. A diferencia del rifle, su cañón es más corto; siendo un arma de menor calibre y con un alcance más limitado.
- g) Subfusiles o Subametralladora:** Son armas largas, pero de categoría inferior, pues utilizan cartuchos de pistola. Son empleadas en situaciones donde se requiere una

gran capacidad de fuego de corto y mediano alcance. En cuanto a su mecanismo de disparo existen semiautomaticas y automaticas. En varios países solo se permite su comercialización bajo el mecanismo semiautomático.

- h) Ametralladora:** Es una arma larga semiportatil cuyas operaciones de carga, disparo y extracción se llevan a cabo por mecanismos automáticos de gran velocidad, permitiendo un fuego continuo [18].

En la Fig.4, se puede visualizar algunos gráficos que representan algunos tipos de armas: pistola, revolver, rifle y escopeta.

Ha sido necesaria esta revisión de clasificaciones de las armas de fuego pues cada una de ellas presenta una constitución y un mecanismo de funcionamiento diferente. Por ende, la señal de impulso acústico generado al realizar una detonación varía de acuerdo a su tipo. El especialista encargado de determinar la ubicación del tirador, deberá considerar este factor como elemento para poder realizar un correcto análisis, pues cada arma refleja características particulares en la señal analizada.

Realizar la caracterización acústica de la señal generada por un arma con fines de identificación sería un trabajo interesante, así como tratar de diferenciar entre tipos de cartucho (existen armas que pueden utilizar más de un tipo) o bien si se empleó algún tipo de supresor. Sin embargo, tal investigación requiere más recursos, tiempo, y en realidad no es parte de los objetivos de esta tesis. En la literatura se pueden encontrar varios ejemplos de experimentos que demuestran que se puede diferenciar entre la detonación de una escopeta de la realizada por una pistola [19]. No obstante, discriminar entre las detonaciones de dos armas de fuego (del mismo tipo y modelo) utilizando medios de audio grabación convencionales (como los micrófonos de teléfono celular) son insuficientes, por el momento. Nos parece importante esta acotación porque es parte de los alcances de este trabajo de tesis.

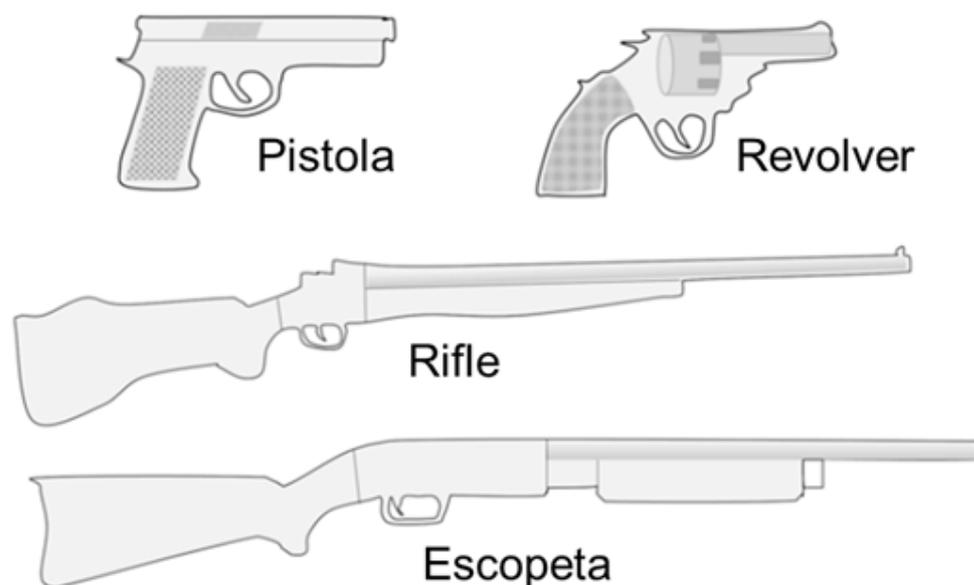


Figura 4. Perfiles gráficos de algunos tipos de armas de fuego. Esquema tomado de *Principles of Forensic Audio Analysis*, Robert C. Maher [20]

### 1.3 Balística de efectos y estimación de la distancia tirador-objetivo

La reconstrucción de incidentes de disparo proporciona información valiosa que en muchos casos ayuda a sustentar o refutar una teoría del caso tal vez marcada por las versiones de los testigos, las víctimas o de los sospechosos. El resultado de tal estudio es significativo para alcanzar decisiones en los tribunales de justicia. Si bien, la reconstrucción de incidentes de disparos debería ser un procedimiento aplicado en todos los laboratorios de análisis forense, al menos en México poco se ha desarrollado, puesto que la mayoría de las instituciones de procuración de justicia carecen de equipos suficientes con las características adecuadas o se requiere personal más capacitado. Hoy su número es insuficiente (presentando una sobrecarga de trabajo) [21].

Así, la pericial de balística se encarga del estudio de las armas de fuego, de los proyectiles, de la trayectoria y trayecto que estas siguen, así como de los efectos que producen cuando impactan sobre el objetivo [22, 23]. Tradicionalmente se ha clasificado la especialidad de balística en los siguientes grupos [24]:

1. **Interior:** se encarga de estudiar el mecanismo de acción del arma y los proyectiles hasta que estos salen del cañón. Abarca el estudio de los fenómenos que ocurren en el interior del cañón de un arma, específicamente lo que sucede desde que el percutor golpea el fulminante y el proyectil sale del cañón.
2. **Exterior:** estudia la trayectoria que sigue el proyectil desde su salida del cañón, hasta el momento en que alcanza al objetivo. El tema es complejo y requiere cálculos que incluyan la forma del proyectil, la densidad, la presión atmosférica, entre otros datos. Este proyecto de tesis se puede ubicar en este apartado.
3. **Efectos:** analiza los efectos causados en el blanco al ser impactado por el proyectil. Es lo que sucede cuando el proyectil interactúa sobre un objeto. Por ejemplo, las heridas y sus efectos sobre seres humanos u objetos inanimados.

Para calcular la distancia desde la que se realizó un disparo, son de gran utilidad cada una de estos grupos, principalmente la exterior y la de efectos. La primera porque permite conocer cuál fue el recorrido que siguió el proyectil, considerando los fenómenos que afectan la estabilidad del proyectil como la resistencia, la gravedad, las condiciones de viento e incluso la temperatura. Conociendo la trayectoria que siguió el proyectil se puede inferir cuál es el punto de origen de la detonación.

La balística de efectos también es de gran utilidad pues, no se observarán los mismos efectos de impacto de un proyectil en un cuerpo blando que en cuerpo duro. Las características del proyectil también pueden influir en la morfología del orificio. Por último, la distancia desde la que se realizó un disparo de arma de fuego genera patrones de fragmentación particulares y característicos que podrían ayudar a estimar la distancia y por ende, ubicar el punto desde donde se realizó la descarga del arma. Sin embargo, hace falta

más investigación empírica respecto a esta materia ya que, pocos son los estudios que se han realizado respecto la trayectoria de proyectiles y sus efectos.

Si bien, esta área es de gran utilidad para poder determinar el punto de origen desde donde se realizó un disparo, es necesario que se complemente con otras técnicas y análisis de indicios; su conjunto permite obtener resultados con un mayor rigor científico y así, obtener una reconstrucción verosímil de los hechos.

Por medio de observaciones inductivas, se cuenta con modelos cualitativos que estiman la distancia aproximada a la que se realizó un disparo de acuerdo a las características de la herida provocada por el disparo, aunque cuentan con una alta incertidumbre. En la literatura se nombran como: estimación de la distancia por efectos balísticos. Los cuales son:

- 1) **Disparo a boca de jarro:** Se realiza con la boca del cañón contactando la superficie impactada. Se caracteriza por marcas de estallidos y arrancamientos cutáneos producidos por los gases supersónicos y calientes, que originan en conjunto la *herida en boca de mina*, ennegrecida por la pólvora quemada [25].
- 2) **Disparo a quemarropa:** Se produce a una distancia inferior al alcance de la llama (máxima de 30 cm). El orificio de entrada se encuentra rodeado por una cintilla de contusión, además de presentar un tatuaje denso y ennegrecido con granos de pólvora y partículas metálicas incrustadas, dentro y fuera de la herida, en cuya superficie se comprueban los efectos de quemadura por la presencia de elementos pilosos quemados parcialmente. Sin embargo, es muy raro observar los efectos de la llama sobre la piel, ya que las pólvoras modernas arden con mayor rapidez y de forma más completa [25].
- 3) **Disparo a corta distancia:** Cuando la distancia está dentro del alcance de los elementos del tatuaje sin evidencia de los efectos de quemadura (entre 30 cm y 70 cm). La herida se caracteriza por la presencia de restos de pólvora no quemados incrustados superficialmente en la piel y de un tatuaje alrededor del orificio de entrada, producto de las partículas metálicas desprendidas. En caso de presentarse variaciones en cuanto a su aspecto, se pueden aprovechar con el propósito de determinar la distancia, según la literatura [25].
- 4) **Disparo a larga distancia:** La herida puede ser producida por un disparo hecho a una distancia mayor un metro. En estas heridas solamente se podrá observar el orificio de entrada rodeado por una cintilla contusiva-erosiva (nombrado también como anillo de Fisher), por lo que a simple vista no se observa la presencia de tatuaje compuesto por pólvora ni incrustaciones metálicas [25].

Debemos señalar que algunos autores como: Vargas Alvarado [26], Patitó [27], entre otros, consideran a los disparos a quemarropa y a corta distancia como lo mismo o bien pueden afirmar que las distancias son ligeramente diferentes. En todo caso, se trata de una estimación que guía la investigación, y no un cálculo de alta precisión.

## 1.4 Estimación distancia por análisis de residuos de disparo

Otras técnicas que permiten estimar la distancia de disparo se basan en el examen de los patrones de residuos de disparo con arma de fuego (*Gunshot Residue* GSR , por sus siglas en inglés), que son todos los materiales emitidos desde la boca del cañón durante el disparo y que acompañan al proyectil, siendo producto de la reacción química fulminante y del acelerador, generando una nube de metales fundidos, hojuelas de pólvora parcialmente quemadas, humo y otras minucias microscópicas [28].

Los GSR se pueden clasificar en dos tipos: orgánicos e inorgánicos. Los residuos orgánicos se originan de la carga propulsora del propelente y lubricantes del arma de fuego, constituida por partículas de pólvora completa y parcialmente quemadas, algunos productos de transformación e hidrocarburos. Los residuos inorgánicos, como los nitritos y las partículas metálicas se originan a partir del fulminante, la cubierta del cartucho, la cubierta del proyectil y desde el cañón del arma [29].

Los residuos pueden depositarse en las manos de quien disparó el arma, en el orificio de entrada de la víctima o en otras superficies cercanas [28]. Particularmente, estos residuos se han empleado con el propósito de determinar si una persona ha realizado recientemente un disparo de arma de fuego. Sin embargo, también pueden ser de gran utilidad para estimar la distancia entre el arma de fuego y el objetivo [28].

Los GSR pueden ser localizados por inspección cuando se presenta alto contraste entre el sustrato (tela, piel u otro material) y los fragmentos. No obstante, en la mayoría de los casos, es necesario realizar pruebas químicas u otros análisis con el fin de examinar los patrones de GSR [30].

Algunas pruebas químicas, por ejemplo: la prueba Modificada de Griess y la de rodizonato de sodio, permiten observar las características de los patrones de GSR a través de un cambio de coloración. La tonalidad de color variará dependiendo la concentración de GSR presente. Una concentración alta de GSR dará como resultado una coloración de tono más fuerte, indicando que la distancia entre el arma y el objetivo es menor a 1 m. Si la concentración de GSR disminuye, la distancia de disparo aumenta [28,31].

Se debe considerar que los resultados obtenidos de estas pruebas son estimadores presuntivos, ya que por lo general, se basan solo en una observación cualitativa del cambio de color, mas no determinan de forma cuantitativa la cantidad de GSR presentes en el objeto de estudio. Además, este tipo de pruebas son susceptibles a falsos positivos y negativos. Entre los factores que más influyen en los resultados se encuentra el tiempo, pues mientras más tarde en realizarse la prueba, menor será la presencia de GSR. Así mismo, algunos de estos residuos pueden provenir de otras fuentes como: pinturas con elementos metálicos o de ambientes cercanos a zonas industriales, generando falsos positivos. Claro, se debe asegurar la adecuada condición de los reactivos y materiales, además de la experiencia del operador de la prueba para asegurar buenos resultados.

Para estimar distancias cortas, entre 0-100cm, algunos laboratorios han empleado la Fluorescencia de rayos X (XRF) [32], la Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS) [33], Espectrofotometría de Absorción Atómica sin llama (FAAS) [34], el Análisis de Activación de Neutrones (NAA) [35], entre otras técnicas.

Dichas técnicas poseen la ventaja de ser menos destructivas, más rápidas y no requieren una preparación previa de la muestra en el estudio. Los resultados que se obtienen permiten conocer las concentraciones de metales producto de disparo de arma de fuego, entre los que se encuentran: bario, plomo, cobre, estaño, entre otros. Los niveles de concentración disminuyen conforme la distancia de disparo aumenta, por lo que existe una correlación entre la concentración de metales y la distancia desde la que se realizó el disparo. Finalmente, en la literatura se sugiere la Microscopia de Escaneo Láser Confocal como apoyo para observar patrones GSR depositados en la piel [36].

Las técnicas ya antes mencionadas solo permiten dar una estimación aproximada de la distancia puesto que, podría variar en función del arma empleada, las municiones y las condiciones ambientales. Por ejemplo, un objeto presente entre la boca del arma y el objetivo, puede absorber una gran cantidad de residuos de disparo, haciendo parecer que el disparo se realizó a una larga distancia. Por ello, es recomendable que el examinador realice varios ensayos con el arma recuperada, de ser posible, y con la misma marca de municiones, e incluso en condiciones en las que ocurrió el hecho. Si bien, el contemplar dichos factores puede ayudar a realizar una estimación aproximada, el problema radica al momento de determinar disparos de larga distancia: una baja cantidad de residuos puede presentarse en disparos que se hayan realizado tanto a 10 como a 100 metros. Por lo tanto, la precisión en las estimaciones de disparos a distancias lejanas es muy baja.

Siendo que, no existen técnicas y métodos que permitan realizar una estimación de la distancia desde la que se realiza un disparo, sobre todo cuando estos se producen a largas distancias, proponemos emplear registros acústicos de disparos como un método alternativo para solucionar el problema.

## 1.5 Determinación de distancia por medios acústicos

Las grabaciones de audio de disparo también puede proporcionar información referente a la posición del tirador, la velocidad y la trayectoria del proyectil e incluso el tipo de arma empleada. Sin embargo, esta técnica presenta algunas complicaciones; entre las más relevantes mencionare: los fenómenos acústicos, la sincronía de registro de los dispositivos móviles, la dependencia angular y la sensibilidad del micrófono. Todos estos factores deben ser contemplados en la investigación. De igual manera, se han presentado casos en los que las armas de fuego se les adapta un silenciador o supresor acústico. Los supresores acústicos disminuyen la amplitud de la onda acústica, dificultando su detección y análisis. Un supresor acústico consiste cilindro dividido en varias cámaras que filtran la mayor cantidad de gases, disminuyendo el efecto sonoro de estruendo.

En el mercado existen sistemas útiles en la localización de francotiradores, especialmente diseñados para utilizarse en conflictos armados. Los más populares son:

- *BBN Boomerang*. Un sistema de detección de fuego y localización de francotiradores acústico. Se instala principalmente en vehículos de combate. El equipo se conforma por siete micrófonos, una caja electrónica y una cámara. Posee un tiempo de respuesta de 1.5 segundos y cuenta con un alcance de detección de hasta 150 m. Este sistema ha sido utilizado por las fuerzas estadounidense en Irak y Afganistán [37].
- *REDOWL* (Acrónimo en inglés de: *Robot Enhanced Detection Outpost with Lasers*). Un sistema que contiene equipos que pueden detectar los sonidos y ecos producidos por armas de fuego. Puede determinar la dirección desde donde se realizó un disparo. El sistema está equipado por una cámara infrarroja, un receptor de posicionamiento global (GPS) y un buscador láser (telémetro) que permite ubicar la posición exacta del francotirador [38].
- *ShotSpotter*. Un sistema que detecta las señales de onda disparo de una área amplia. Se encuentra equipado con sensores acústicos que analizan las señales de audio del lugar. Los algoritmos de aprendizaje automático permiten diferenciar un sonido producto de la naturaleza del lugar del sonido producto de un disparo de un arma de fuego [39].

Sin embargo, estos no son los únicos sistemas que permiten la detección de un disparo. En el mercado existen una gran variedad de ellos. Con todo, su uso sólo ha sido destinado a combates armados, pero no en el ámbito civil al menos en nuestro país. Naciones como Estados Unidos ha implementado este tipo de tecnologías, colocando sensores en las ciudades urbanas más peligrosas. Esto podría considerarse como uno de los primeros pasos en los que la identificación de una detonación de arma de fuego por medios acústicos en el ámbito civil [40].

Como mencionamos antes, la cifra de homicidios por arma de fuego se ha incrementado de forma alarmante, por ende es necesario la aplicación de nuevos métodos y técnicas que permitan obtener con precisión la posición del tirador, siendo que los métodos antes mencionados no son adecuados para realizar estimaciones en disparos a largas distancias, presentando una alta incertidumbre en sus resultados, o bien por su alto costo, solamente son empleados en conflictos armados.

Otra alternativa, que podría ayudar a solucionar el problema es el colocar sensores en sitios donde se encuentren colocadas videocámaras, estos llevarían a cabo la detección y el registro de los sonidos característicos de la detonación de un arma de fuego.

Los audios pueden ser un hallazgo de importancia en la investigación, además de complementar en un tribunal la versión de los testigos y otros estudios forenses. Por consiguiente, mencionaremos un caso cuya solución se dio a partir del análisis registro acústico de una videograbación <sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>

Actualmente, la tecnología puede jugar un papel fundamental en la investigación de este tipo de hechos. En México 8 de cada 10 persona disponen de un teléfono inteligente, según un informe

## 1.6 Resolución de caso a través de la acústica forense

### **Rodolfo G. “Willy” Pregliasco y su intervención en el caso “Teresa Rodríguez” [41]**

Los hechos acontecen el 12 de abril 1997 en Argentina. Una mujer de nombre Teresa Rodríguez murió a causa de un disparo de arma de fuego. El incidente ocurrió sobre el puente que entra a Plaza Huinca, en donde la policía trataba de despejar a un grupo de manifestantes. Este hecho fue videograbado y capturado en fotografías. A pesar de contar con tal evidencia, se presentaba la dificultad de identificar a la persona que realizó el disparo.

Dos años después, el caso volvió a adquirir relevancia. Un juez designó como peritos de oficio a dos físicos: Rodolfo G. “Willy” Pregliasco y Ernesto N. Martínez. La labor de investigación partió de las siguientes evidencias: fotografías, un video de 16 s y el lugar de los hechos. Sin embargo, la nitidez del video y de las fotografías era de baja calidad.

Con toda esa cantidad de evidencias, los investigadores optaron por determinar la posición del tirador a través de la videograbación, pero no analizando las imágenes, sino el audio. Así que, una mañana como del día de los hechos, acudieron al lugar, y a modo de experimentación midieron la señal acústica de la detonación de cuatro petardos de prueba, estos fueron colocados en puntos diferentes. Además se empleó un micrófono, este fue colocado en el mismo sitio donde se había realizado la videograbación. Descubriendo que la fuente de ecos correspondían a 8 postes de alumbrado, encontrados a los costados del puente, y que cada patrón de eco observado en el espectrograma era distintivo para cada detonación. Al conocer elementos como: el tiempo transcurrido entre la onda transmitida y la onda reflejada, así como, la velocidad del sonido en función de la temperatura, lograron calcular la distancia entre los postes y el micrófono.

Para saber cuáles eran las fuentes de eco realizaron el trazado de elipses, cuyos focos eran la fuente sonora y el micrófono. Al superponer las elipses de cada uno de los petardos en el plano del lugar donde se había producido el hecho pudieron ubicar las diferentes posibles fuentes de eco, siendo los 8 postes de iluminación. Para ubicar las posibles fuentes de disparo, adoptaron el mismo modelo pero a través de otra figura geométrica: la hipérbola, cuyos focos eran la posición del micrófono y la fuente de eco, es decir el poste de luz, como no sabían exactamente qué eco asignar a cada poste, lo que hicieron fue asignar todos los ecos a cada uno de los postes. La intersección común de las hipérbolas daba el origen del disparo. Al obtener las coordenadas exactas de las fuentes de eco y compararlas con las de la videograbación, lograron determinar que el origen de los disparos se produjo en la zona en donde se encontraban los granaderos, e incluso pudieron determinar qué granadero había accionado el arma.

El sonido fue el elemento que les permitió obtener información para alcanzar el objetivo. Emulando, en esta tesis emplearemos el sonido como fuente de información que nos permitirá determinar la posición de un tirador.

---

del Instituto Federal de Telecomunicaciones [41], existiendo la alta probabilidad de que un disparo sea capturado a través de estos dispositivos.

# CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

A continuación, describiremos algunos conceptos de acústica que son necesarios para establecer el contexto de este trabajo. Si bien estos se pueden consultar en otras fuentes, como libros de texto, es oportuno que esta obra trate de ser autocontenida en las secciones más relacionadas con el trabajo de investigación.

## 2.1 Fundamentos de fenómenos ondulatorios

El concepto esencial de esta tesis es la onda, que es una propagación de energía sin el transporte de materia [42]. Las ondas se generan cuando se perturba el estado de equilibrio de un sistema, de modo que la señal viaja de una región a otra [43]. Los elementos fundamentales de toda la onda sonora son los siguientes:

- **Amplitud:** Es la máxima distancia que puede alcanzar una partícula respecto a su posición de equilibrio [43].

El valor cuadrático medio (RMS, por sus siglas en inglés Root Mean Square), determina el nivel medio significativo de la amplitud de una señal acústica en determinado tiempo. El RMS se calcula elevando al cuadrado las amplitudes de los diferentes puntos de la onda, posteriormente, se obtiene el promedio resultados obtenidos, y se calcula la raíz cuadrada. En la Fig. 5 se visualiza un esquema que representa la sumatoria de los valores de la amplitud en diferentes puntos de la onda.

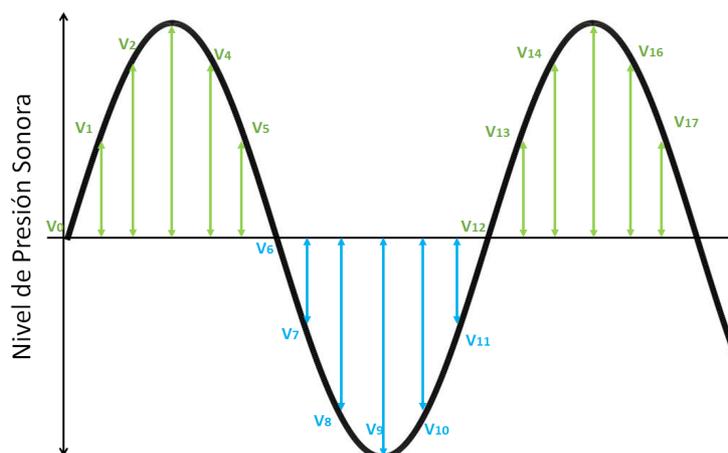


Figura 5. Representa la sumatoria de los valores de amplitud en determinados tiempos para calcular el valor del RMS

- **Longitud de onda:** (usualmente se representa con la letra  $\lambda$ ) es la distancia de repetición de un patrón de onda senoidal (las ondas pueden no ser senoidales pero

periódicas). En otras palabras, la longitud de onda es un patrón de onda que se repite. Para una frecuencia fija, esta depende de la rapidez con la que viaja el sonido y el periodo [42]. En la figura 6 se visualiza un esquema que representa a una onda y su longitud.

- **Frecuencia:** es el número de longitudes de onda completas que pasan por un punto por unidad de tiempo. Esta magnitud proporciona el número de ciclos que pasan por unidad de tiempo por un observador fijo. A medida que el número de ciclos se incrementa dentro de un periodo de tiempo, la frecuencia aumenta. Se representa con la letra  $f$  [42].
- **Frecuencia Angular:** se refiere a la frecuencia del movimiento circular expresada en proporción del cambio de ángulo, y se define como  $2\pi$  veces la frecuencia [42].
- **Periodo de vibración:** Es la cantidad de tiempo requerida para una oscilación. Por ejemplo, en una cuerda vibra, es la cantidad de tiempo que se requiera para que una cuerda se mueva de un extremo a otro y regrese a su posición original, completando un ciclo de oscilación. En la figura 6. Se visualiza el esquema de una onda senoidal que viaja en función del tiempo

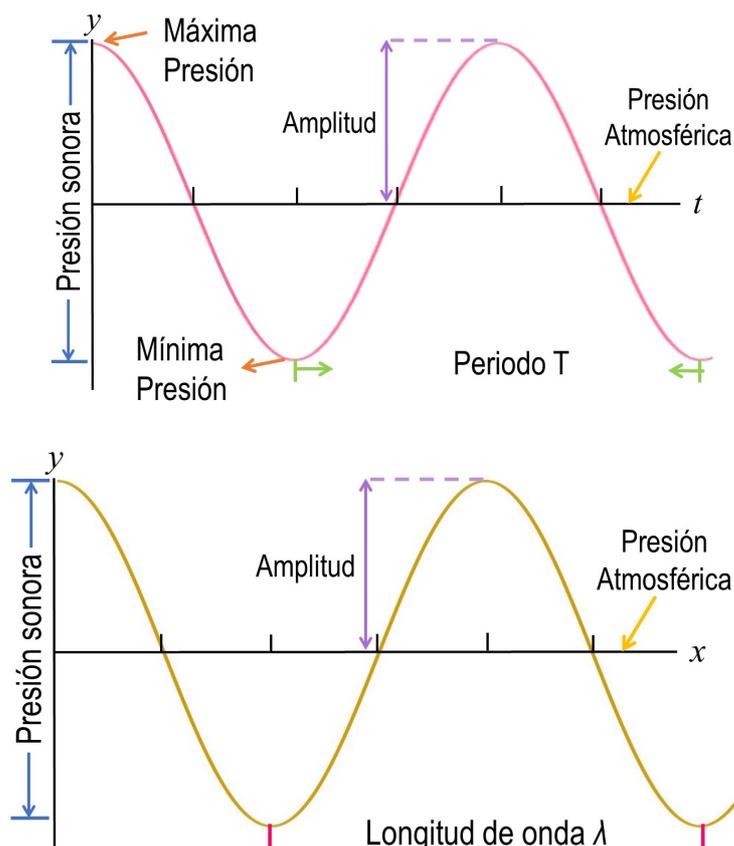


Figura 6. Esquemas que representan ondas senoidales. La figura de arriba a es una onda en función del tiempo y en la parte inferior una onda en función de la longitud de onda.

- **Velocidad de propagación:** matemáticamente es la relación entre la frecuencia y la longitud de onda. Es la velocidad con la que se desplaza un punto de la onda con una fase determinada. Depende de las características del material físico en que se propaga el sonido.
- **Intensidad sonora:** se define como la potencia promedio por unidad de área y por unidad de tiempo. Ésta se mide en watts por metro cuadrado  $W/m^2$  [43] y se puede expresar en decibeles [dB]. Se representa a través de la siguiente fórmula:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

En donde: P es la potencia o la cantidad de energía emitida por la fuente sonora y  $4\pi r^2$  es la superficie esférica sobre la que se distribuye uniformemente la potencia. La fórmula expresa el valor de la intensidad del sonido cuando la fuente puntual se ubica en un espacio abierto, toda la energía que irradia la fuente se distribuye en todas direcciones, en forma esférica. Sin embargo, en una situación más realista se debería contemplar los efectos de la reflexión de las ondas en el suelo.

- **Nivel de presión sonora:** El SPL por sus siglas en inglés *Sound Pressure Level* permite determinar la intensidad del sonido. Siendo que, el sonido es una variación de la presión [43].
- **Fase:** Es una variable que describe la progresión de la onda, y depende del tiempo y la distancia, típicamente de manera lineal. Se identifican partes específicas de la onda con valores específicos de la onda con valores fijos de la fase, aunque a diferentes tiempos se encuentren en diferentes lugares. Se dice que dos ondas están en fase cuando presentan una misma frecuencia, coincidiendo exactamente en tiempo. El resultado de sumar dos ondas en fase y de igual amplitud es una señal con la misma frecuencia pero de doble amplitud. En cambio, si se suman dos ondas senoidales en contrafase, la señal se cancelará y el resultado será la ausencia de señal.

### Fenómenos relacionados con la superposición de ondas

Ahora bien, imaginemos que el disparo de un arma de fuego se efectuó en una habitación. La onda de sonido del producto del disparo se refleja sobre las superficies rígidas del recinto como: las paredes y el suelo, generando el efecto de eco. En este caso, la onda inicial de la detonación y las ondas reflejadas (viajan en direcciones opuestas) y habrá un cruce entre ellas. Es por ello importante considerar los siguientes fenómenos acústicos relacionados a la superposición de ondas:

**Interferencias.** Cuando dos o más ondas se propagan en un mismo medio y tiempo, se superponen en un punto. En la Fig.7 se visualiza un esquema dos tipos de interferencia.

**Interferencia constructiva.** Ocurre cuando las dos ondas están en fase. Las amplitudes se suman.

**Interferencia destructiva:** al interferir dos ondas, en los puntos donde coincide una cresta de una onda con un valle de la otra onda se dice que hay interferencia destructiva. Es decir, cuando las dos ondas están  $180^\circ$  fuera de fase. Las amplitudes en este caso se restan y pueden anularse por completo [43].

**Principio de Superposición:** Señala que, cuando dos o más ondas se mueven a través de un medio, el valor de la función de onda resultante es igual a la suma algebraica de los valores de las funciones de onda individuales. De hecho, este principio se relaciona con las interferencias [43].

**Batimientos.** Este fenómeno se presenta cuando dos fuentes sonoras producen ondas que tienen frecuencias ligeramente diferentes.

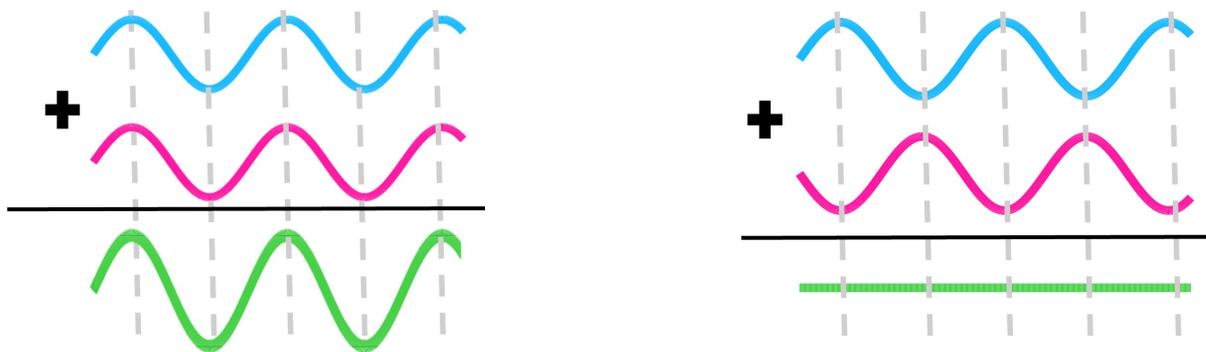


Figura 7. Esquemas que representan: a la izquierda superposición constructiva y a la derecha una superposición destructiva.

## 2.2 Transformada de Fourier

Los sonidos que a diario escuchamos son señales complejas. Por ejemplo, una melodía no es más suma de múltiples ondas simples (combinación de senos y cosenos de distintas amplitudes y frecuencias armónicas múltiplos de la frecuencia fundamental), tal y como se observa en la Fig. 8.

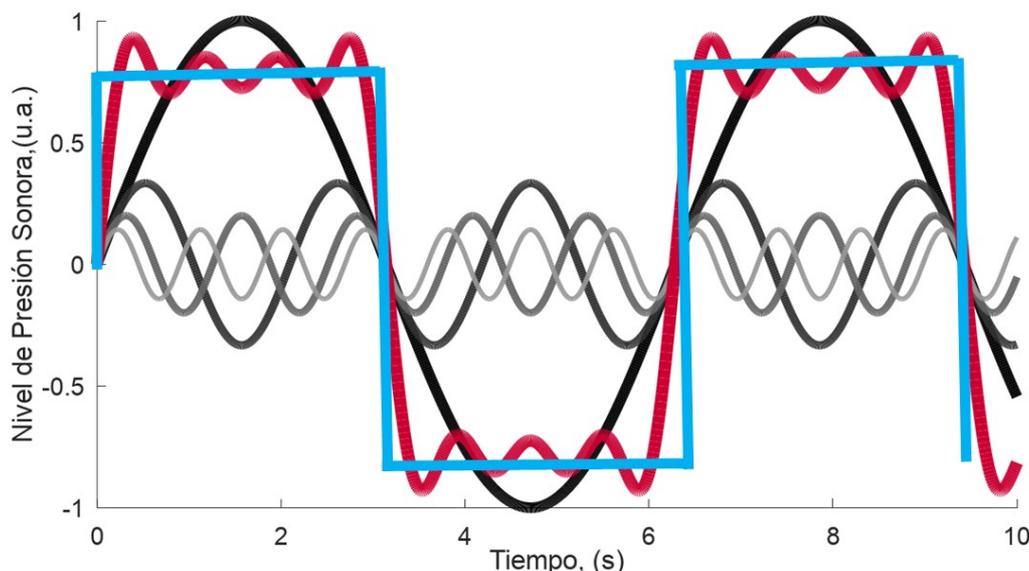


Figura 8. Gráfica de onda cuadrada conformada por la suma de múltiples ondas. En color rojo se muestra la resultante, en tonos grises se marcan las oscilaciones componentes.

Una onda complicada periódica es siempre la suma de ondas con frecuencias que son múltiplos enteros (armónicos). Entonces, cada onda oscila con una rapidez que es un múltiplo entero de la onda fundamental. Sin embargo, el problema que comúnmente se busca resolver es qué, a partir de una señal compleja se logre determinar las ondas que la conforman. Para ello, el matemático Fourier estableció que cualquier función periódica puede ser representada mediante una suma de senos y cosenos [44]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.2)$$

donde  $a_n$  y  $b_n$  representan a los coeficientes de la serie trigonométrica de Fourier, estos deben sumarse entre sí para obtener la señal analizada. La letra  $t$  representa el tiempo en segundos y  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  es la frecuencia angular asociada a un periodo  $T$ . La frecuencia angular es un parámetro fundamental que permite determinar las características de las ondas que conforman la señal compleja.

Los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  representan la amplitud de cada una de las ondas simples que conforman la onda compleja o señal. Cabe señalar que al descomponer una onda

compleja encontramos una infinidad de ondas con diferentes frecuencias y amplitudes. Los coeficientes de Fourier se calculan a partir de integrales definidas, con límite inferior 0 y límite superior T (periodo). Es decir, a partir de estos valores se encuentra en un área comprendida entre 0 y T de la onda qué es la función  $f(t)$ , aunque puede elegirse cualquier otro intervalo de longitud T. La función  $f(t)$  se multiplica por una onda que oscila a la misma velocidad angular a la función sinusoidal que se desea hallar y posteriormente se divide el resultado entre  $2/T$ .

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.5)$$

La Transformada de Fourier (por sus siglas en inglés: TF) permite visualizar de una mejor manera el comportamiento de una señal a cierta frecuencia facilitando su tratamiento. El espectro de frecuencias, es el resultado de la TF, en la que podemos visualizar gráficamente al sonido. En esta se incluye datos sobre las frecuencias que contiene y los niveles de presión sonora. La TF permite conocer las características espectrales de una gran variedad de señales acústicas de interés forense.

La TF nos permite visualizar si existe más de una fuente sonora. Por ejemplo, si el archivo de audio contiene el registro de un disparo de arma de fuego y además se grabaron otros sonidos (ruido). La TF puede realizar un filtro, ya que el sonido de la detonación presenta algunas características frecuenciales que se diferenciarán de las presenta el ruido. Por tanto, al separar las distintas frecuencias que componen el audio y dejando aquella que corresponde a la detonación, podremos obtener una señal limpia de ruido.

Es una herramienta matemática ampliamente utilizada en diferentes áreas del quehacer científico como la óptica [45], las telecomunicaciones [46,47], la medicina [48,49], entre otras. Una variación de su algoritmo digital es la transformada rápida de Fourier FFT.

La FFT permite realizar transformaciones de señales de dominio del tiempo al dominio de frecuencia, sin que esto implique un cambio o pérdida en en el contenido de la señal. La FFT sigue siendo un algoritmo que requiere el uso de ordenadores para realizar todas las operaciones necesarias para resolver un problema sencillo (tratar de alcanzar una respuesta con lápiz y papel es impráctico).

Sin embargo, aunque la computadora permite realizar casi de forma automática el análisis de la señal, es importante conocer su fundamento, entender cómo surgen índices y los gráficos que nos permiten visualizar y analizar de una forma más sencilla un sonido complejo, como el generado por el disparo de un arma de fuego.

## 2.2.1 Gráficos representativos de señales temporales

Para realizar una correcta interpretación de la señal acústica registrada es necesario valerse del apoyo de ciertos gráficos. Algunos programas de análisis digital del sonido pueden extraer los parámetros acústicos como la amplitud, a frecuencia, la intensidad y la fase. Los gráficos que pueden ayudarnos a obtener estos datos son:

- **Oscilograma-(*waveform*)**, representa las variaciones en la presión sonora (eje de las vertical) a lo largo del tiempo (eje horizontal). Este tipo de gráfico permite determinar si una señal se comporta de forma periódica o aperiódica [20].
- **Espectro**, es una representación gráfica que permite visualizar en el eje de las ordenadas la distribución de la intensidad del sonido respecto las frecuencias reflejadas que se mostrarán en el eje de las abscisas. De hecho este gráfico es resultado del cálculo de la Transformada de Fourier [20].
- **Espectrograma**, es una representación gráfica que permite representar una señal de la siguiente manera: en eje vertical (ordenadas) se mostrará la frecuencia a la escala de Hertz, mientras que, en el eje horizontal (abscisas) se visualiza la señal de un determinado tiempo [20].

## 2.3 ¿Qué es el sonido?

La palabra sonido muestra dos acepciones de nuestro interés forense. Los fisiólogos lo definen en términos de una sensación auditiva, que es percibida a través del aparato auditivo. Para los físicos, el sonido es una perturbación por sí misma y no se refieren a la sensación que esta produce [50]. Nosotros utilizamos esta última definición.

El sonido es una forma de onda que se propaga por un medio elástico (gases, líquidos y sólidos). Su estudio lo realiza la acústica. El sonido es un fenómeno vibratorio que, a partir de una perturbación inicial del medio elástico donde se produce, se propaga bajo la forma de una variación típicamente periódica de presión [51].

El sonido, de acuerdo a su naturaleza de propagación se clasifica como una onda mecánica, esto quiere decir, que para su propagación necesita viajar a través de un material o una sustancia. Es una onda longitudinal puesto que, los movimientos de las partículas se desplazan sobre el mismo eje en que viaja la onda.

Existen diferentes frecuencias, algunas muy altas (ultrasonidos) y otras demasiadas bajas (infrasonidos), mismas que son inaudibles para el oído humano. Para efectos de este proyecto se utilizarán las frecuencias en el intervalo entre 250 a 20,000 Hz, siendo estos los valores representativos de los límites de audición en los humanos, idealmente de 20 Hz a 20,000 Hz. Es así que, las frecuencias de sonido que escuchamos se pueden clasificar en tonos graves, cuyas frecuencias son bajas 20 a 250 Hz, tonos medios con valores de 250 a 2,000 Hz, y los tonos agudos cuyos valores comprenden frecuencias entre 2 y 20 kHz.

### 2.3.1 Velocidad de propagación

Dependiendo de las particularidades del medio de propagación, el sonido tendrá una rapidez característica. Puede ser dependiente de la presión atmosférica, las condiciones de viento, la humedad, entre otros [18]. Pero es la temperatura el parámetro principal para describir la velocidad del sonido que utilizamos en esta tesis.

En el aire, el sonido viaja a una rapidez de 343.2 m/s a una temperatura 20° C, por ejemplo. De hecho, la rapidez del sonido en el aire como función de la temperatura se aproxima adecuadamente mediante la siguiente fórmula:

$$c = c_0 \sqrt{1 + \frac{T}{273}} \quad (2.6)$$

donde T es la temperatura del aire en grados Celsius y  $c_0$  es la velocidad del sonido en el aire a una temperatura de 0°C, es decir: 331 m/s. La Fig. 7 exhibe el comportamiento de la fórmula, considerando la temperatura más baja y más alta registrada en el mundo, -89.2°C en Vostok, Antártida el 21 de julio de 1983 [52], y 56.7°C Death Valley, California, el 10 de julio de 1913 [53]. También se han añadido datos respecto a las temperaturas mínima y máxima en la Ciudad de México. La temperatura máxima histórica es de 38.5°C en diferentes delegaciones como: Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Tláhuac y Xochimilco [54], y la mínima registrada es de -10° en Cuajimalpa de Morelos [55], datos que han sido reportados por el Servicio Meteorológico Nacional.

La Fig. 9 muestra la dependencia teórica de la velocidad del sonido en función de la temperatura del medio de propagación; es decir, conforme la temperatura disminuye la velocidad también lo hace, y viceversa. Por ejemplo, a una temperatura extremadamente baja (como la registrada en la Antártida) se observa que la velocidad del sonido es de 271.59 m/s, mientras que, una temperatura alta (registrada en California) la velocidad es de 363.26 m/s. La velocidad de diferencia entre ambos valores es de 92.26 m/s, con una diferencia de temperaturas entre ambos de 145.9°C. En contraste, en la Ciudad de México se observa que la velocidad del sonido a la temperatura más baja reportada es de 324.88 m/s y la velocidad más alta es de 353.29 m/s, siendo que la diferencia de temperaturas es de 48.5°C. Entonces, la velocidad del sonido varía incluso en un mismo lugar puesto que, para un viaje de tiempo 1 s representa una diferencia de 28.41 m. En la tabla 1, se hace una comparación de los valores de velocidad del sonido calculados.

En conclusión, el sonido viaja mucho más rápido cuando la temperatura del medio en que se propaga es alta, y su velocidad disminuye cuando la temperatura decrece, siendo la temperatura un factor que puede afectar a la velocidad del sonido y qué se debe contemplar con el propósito de determinar la posición del tirador, método que expondremos más adelante en este documento.

La velocidad del sonido aumenta aproximadamente 0.61 m/s por cada grado centígrado de aumento de la temperatura. Este valor indica el grado de incertidumbre de la velocidad. Si hubiese un error al realizar la medición de la temperatura por un grado centígrado, el error es poco significativo.

### Obtención del dato histórico de la temperatura ambiente

En este proyecto requerimos mediciones de temperatura para calcular la velocidad del sonido. En un contexto forense operativo, ¿Cómo se obtiene este dato? Algunas fuentes que pueden proporcionarnos la información son:

- **El Programa de estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario**, Este organismo ha recopilado algunas temperaturas desde 1996 hasta la fecha. Sin embargo, debe considerarse que estos datos no se encuentran validados, algunas de las estaciones que integran esta red son: el Centro del Ciencias de las Atmósfera (CCA), las preparatorias y CCHs.

Mundo			Ciudad de México	
	Temperatura (C°)	Velocidad (m/s)	Temperatura (C°)	Velocidad (m/s)
Mínima	-89.2	271.59	-10	324.88
Máxima	56.7	363.26	38.5	353.29
Intervalo	145.9	91.67	48.5	28.41

Tabla 1. Valores de la temperatura y la velocidad del sonido.

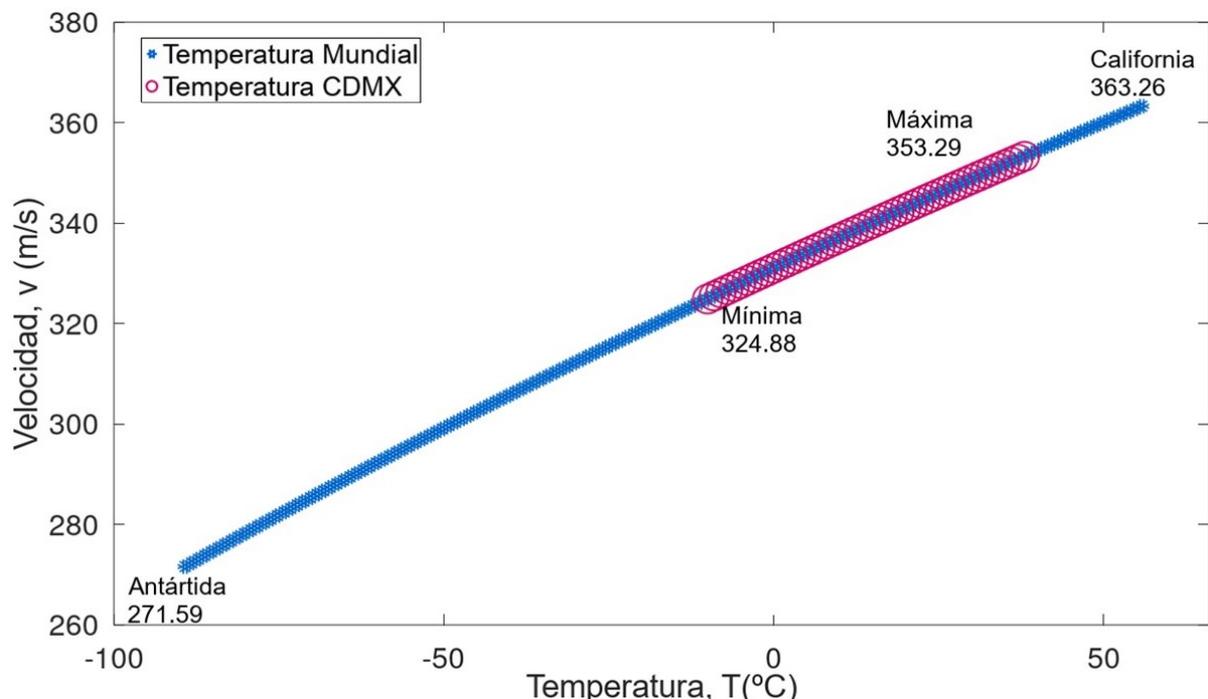


Figura 9. Variación de la velocidad del sonido en función de la temperatura. En color azul se representa el comportamiento de la velocidad del sonido entre temperaturas extremas registradas a nivel mundial; en color violeta se representa la velocidad del sonido en la Ciudad de México en función de la temperatura mínima y máxima.

Esta información puede ser útil para otros trabajos académicos o públicos; pero su falta de certificación y cubrir más territorio puede ser una desventaja desde el punto de vista del desahogo de información pericial en un litigio judicial.

- **El Sistema Meteorológico Nacional, SMN.** Cuenta con una herramienta en línea que permite tener acceso a información climatológica a partir de las 5,500 estaciones registradas en la base de datos climatológicos del SMN. La información disponible es: la temperatura mínima y máxima, datos de humedad, de presión, pluviales, entre otros datos. Del total de estaciones meteorológicas, 61 estaciones se encuentran ubicadas en la Ciudad de México. Sin embargo, las series de datos disponibles no se encuentran actualizadas, ya que 4 de las 6 estaciones tienen registros a lo más hasta 1990. Por su contexto público y su capacidad instrumental, la información del SMN es la más adecuada para conseguir la información requerida sobre la temperatura particular en un momento y lugar.

En un principio, un perito cuenta con fundamento jurídico, lo que le facilita obtener el dato. Es de esperar que el personal de la SMN cumpla en tiempo y forma con la petición legal. No obstante, en trabajos académicos, como el presente documento, la situación es diferente. Los datos se encuentran en reserva (la información no está disponible para el público en general, *open-data*). De modo que recurrimos al Instituto Nacional de Transparencia, Acceso a la Información y Protección de Datos Personales INAI mediante solicitud con el propósito de obtener la temperatura del Centro de Tlalpan de los días 27 y 28 de septiembre del 2018. La fecha se seleccionó al azar, solo con la intención de observar la viabilidad de obtener el dato. En el Anexo B se puede consultar el proceso.

La información que fue proporcionada por SMN, consiste en dos hojas de cálculo, una por día. En las que se observa el registro de diferentes parámetros; entre los que se encuentran: la temperatura a bulbo seco, la temperatura a bulbo húmedo, temperatura al punto de rocío, entre otras. De todos estos parámetros la temperatura a bulbo seco, creemos que es la adecuada para obtener la velocidad del sonido. La temperatura a bulbo seco se obtiene colocando al descubierto, con el bulbo libre de humedad. La consideran como la verdadera temperatura del aire.

El instrumento también facilita la lectura de la temperatura en función de la humedad del aire en el ambiente, a lo que se llama temperatura a bulbo húmedo. Este dato podríamos utilizarlo cuando queremos conocer como se ve afectada la velocidad del sonido en función del flujo de humedad en el ambiente, pero este no es el caso.

Otros datos de temperatura fueron innecesarios. Por ejemplo, la temperatura en punto de rocío, que es la temperatura a la cual el vapor de agua que se encuentra en el ambiente y comienza a condensarse o solidificarse; su efecto se deriva en la presencia de rocío o neblina. Entonces, en este proyecto, el mejor dato de la temperatura es la de bulbo seco. Pues, es el único parámetro necesario para efectuar los cálculos es la temperatura, independientemente de la variación de la humedad o la presión del vapor en el aire.

### 2.3.2 Fenómenos de propagación del sonido

Cuando una fuente emite un sonido, se deben considerar las siguientes características:

- a) **Dirección de propagación.** Siempre será rectilínea en un medio homogéneo, esta será siempre perpendicular a los frentes de onda.
- b) **Frente de onda.** Se extenderá de forma radial y tridimensional, a partir de la fuente emisora de sonido. En otras palabras, el frente de onda se puede modelar en esferas o círculos concéntricos, cuyo centro es la fuente de sonido.

### 2.3.3 Fenómenos acústicos relacionados con la propagación de sonido

Los casos reportados de homicidios ocurren en diferentes tipos de escenarios. Puede tratarse de un espacio abierto, cerrado o mixto. El impulso de la detonación de un arma de fuego, puede verse afectada por el entorno donde se realizó la acción. Por ello, es importante conocer los diferentes fenómenos acústicos que pueden interferir en su comportamiento. Los principales fenómenos acústicos que afectan la propagación del sonido son los siguientes:

- a) **Absorción.** Se define como la disminución de la intensidad de onda debido a la naturaleza y al medio que se propaga. Por ejemplo, si el escenario se caracteriza por tener muros y suelo de materiales lisos y sin porosidades, entonces se producirá una menor absorción en comparación a aquellos que tengan porosidades. Las mediciones obtenidas en experimentos demuestran que en un espacio abierto como son las áreas boscosas de gran vegetación, la absorción juega un rol importante en la atenuación del sonido [18].

Las cámaras anecoicas son espacios diseñados para la absorción acústica para evitar reflexiones y cuya propagación del sonido es similar a la de un espacio abierto. Ejemplos de espacios anecoicos son: las salas de cine y de grabación.

- b) **Reflexión.** Es un fenómeno acústico que sucede cuando la onda sonora incidente choca o rebota sobre una superficie de un medio cualquiera de distinta densidad al medio en el que viaja. Por ejemplo, en un espacio cerrado sería correcto pensar que el sonido se refleja en una mayor cantidad de superficies, puesto que este se refleja o impacta sobre el techo, las paredes, el suelo, etc. Entonces, el sonido que escucharemos no será solamente el de la fuente emisora, sino también el generado por las múltiples reflexiones, cuya intensidad de sonido será menor [18].
- c) **Reverberación.** Es la suma de múltiples reflexiones. Es producto la absorción y reflexión, puesto que, cuando una onda sonora incide sobre una superficie, una parte de su energía se refleja y el resto se absorbe. Entonces, si el recinto se caracteriza por contener una superficie que refleja la mayor cantidad de energía sonora, y una

menor cantidad es absorbida, afirmamos que se trata de un recinto reverberante. Este fenómeno, se presenta principalmente en recintos cerrados muy amplios. Las cámaras reverberantes son espacios que tienden a reflejar todo el sonido incidente. Normalmente las iglesias y los templos de culto son espacios muy reverberantes.

- d) **Transmisión.** Es un fenómeno acústico se presenta cuando la energía de la onda atraviesa una barrera u obstáculo, dependiendo de las características de las paredes, el suelo y el techo del lugar. Este fenómeno es importante, puesto que, el registro acústico del celular podría ocurrir en una habitación contigua a la habitación en donde ocurrió el hecho. La energía de la onda disminuirá su intensidad debido al muro que atraviesa por absorción y reflexión.

Por tanto, podemos decir que las características acústicas del recinto o espacio, son importantes para determinar el comportamiento del sonido. Por ello, es necesario conocer las características del lugar del hecho antes de efectuar el análisis del impulso acústico del disparo. El estudio de las cualidades acústicas de un recinto, corresponde a la acústica arquitectónica. En un caso forense, este análisis sería de utilidad.

## 2.4 Acústica del disparo de arma de fuego

Cuando se genera un disparo por arma de fuego, generalmente lo que se escucha es un estruendo. Si empleamos una cámara de fotografía ultrarrápida que llevará el registro fotográfico justo en el momento de un disparo, primero se observa la salida de una onda de choque de la boca del cañón y posteriormente el proyectil. Detrás de este se observará la salida de una nube de gases propulsores, producto de la ignición de la pólvora, que se propagan rápido debido al cambio de presión –al estar confinados en el interior de la cámara del cañón, se encuentran a alta presión; luego, en el exterior, la presión es más baja. La presión con la que salen los gases logra empujar al proyectil hacia una dirección de menor resistencia, es decir fuera del cañón. Los gases se expanden de súbito apartándose del aire circundante formando una onda de choque, que identificamos como el estruendo escuchado. En resumen, el fenómeno acústico que se visualizará del disparo de un arma de fuego serán dos ondas de choque, la primera que va seguido del proyectil y finalmente la onda expansiva de boca, en la Fig. 10 se visualizan estos fenómenos. A continuación, señalaré a más detalle, en qué consiste estas dos ondas de choque. Los elementos que conforman la acústica de disparo son:

**A) Onda de choque (*Shockwave*)[56].** Es un fenómeno acústico producido cuando un objeto viaja a una velocidad supersónica, a una velocidad mayor a la velocidad del sonido, generando un frente de onda en forma cónica que se expande detrás del proyectil. El ángulo en el ápice del proyectil depende del número de Mach **M**, que es la razón entre la velocidad del proyectil y de la velocidad del sonido. Cuando la velocidad del proyectil es mayor en relación al sonido, la apertura del cono será menor.

En un oscilograma, la onda de choque la podemos visualizar con forma de una N, al principio muestra un pico alto debido a la gran cantidad de energía y seguidamente habrá un decrecimiento en la presión sonora. Las presiones negativas también tienen mucha energía.

Sin embargo, debe considerarse que algunos proyectiles viajan a velocidades supersónicas, y por ende, no todos producirán este tipo de ondas. También, se debe entender que el proyectil conforme va viajando va perdiendo velocidad, lo que tendrá como efecto la caída del proyectil, por lo que la forma cónica de la onda no será perfecta. Otros factores que se deben contemplar son el arma de fuego empleada, las características de la munición y la ubicación del micrófono respecto a la línea de fuego.

**B) Muzzle blast (onda expansiva de boca).** Este fenómeno acústico se caracteriza por ser una señal acústica que posee una alta energía debido a la elevada presión con la que una gran cantidad de gases son expulsados de la boca del cañón, generalmente esta tiene una duración de unos cuantos milisegundos. Dicha señal se propaga a la velocidad del sonido en forma esférica, expandiéndose de adentro hacia afuera a partir de la ubicación en la que se encuentra el tirador, siendo entonces el centro de la esfera la boca del cañón. La energía producto de la explosión se expande en todas direcciones, registrándose la mayor intensidad hacia donde apunta el cañón. Las características de este fenómeno dependen de los mecanismos generadores de la fuente y varían según la marca, el modelo, la longitud del cañón y las características específicas del proyectil [56].

Aunque la literatura diferencia a estos dos fenómenos como onda de choque y onda expansiva de boca, ambos deben ser considerados como ondas de choque. Ambos fenómenos se producen por efecto de la diferencia de presiones y temperatura.

Analizando los fenómenos acústicos ya mencionados, podemos obtener información sobre el tipo de disparo, la direccionalidad y algunos otros datos importantes, como el arma empleada. Para efectos de este proyecto, es necesario comprender el mecanismo de generación ya que nos permitirá llevar a cabo un mejor procesamiento de la señal que se desea estudiar, en este caso el producto de la detonación de un arma de fuego.

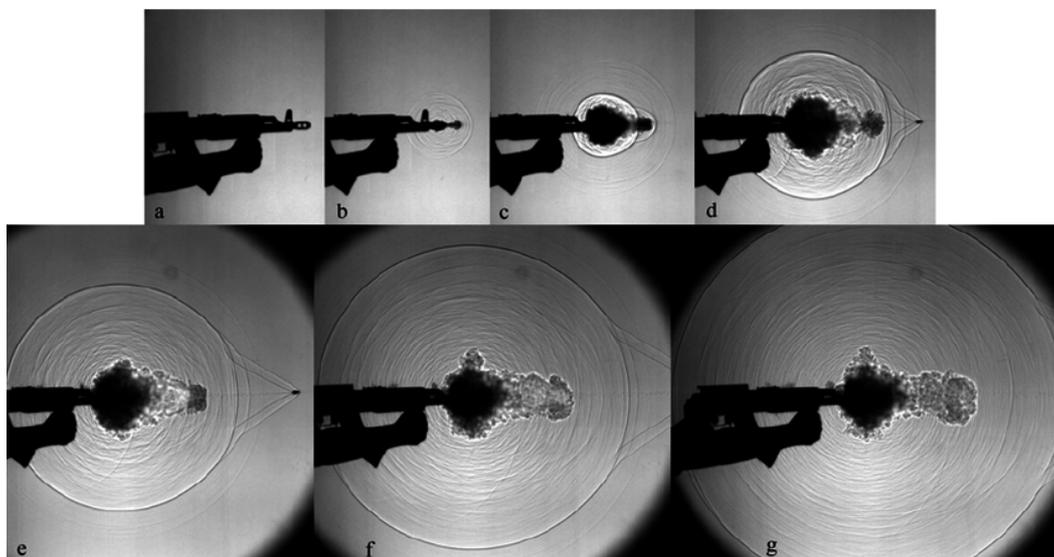


Figura. 10. Onda expansiva de arma de fuego, muestra dos ondas de choque producto del disparo del arma de fuego. Fotografía obtenida de Settles et al. [57]

## 2.5 Localización de tirador mediante la medición tiempo de retardo [58]

El perfil de la onda demuestra que la principal característica en la detonación de un arma de fuego es un pico de alta intensidad y que arriba rápido al sensor, este pico suele ser un indicador de la presencia de la onda de choque. Después le sigue un silencio relativo, y luego se pueden observar otros efectos, e.g. ecos. En la Fig.11., se observa las características acústicas del disparo de un arma de fuego.

Asumiendo que la velocidad del sonido es constante en el medio, podemos escribir:

$$c = \frac{d}{t} \quad (2.7)$$

donde  $d$  es la distancia entre el micrófono y fuente (lo que desea determinar el investigador forense), y  $t$  es el tiempo de que tarda en llegar la señal al micrófono. En condiciones homogéneas y estables, este tiempo es constante. De modo que un frente de onda alcanza a ser registrado primero en el micrófono más cercano, y luego en los más alejados.

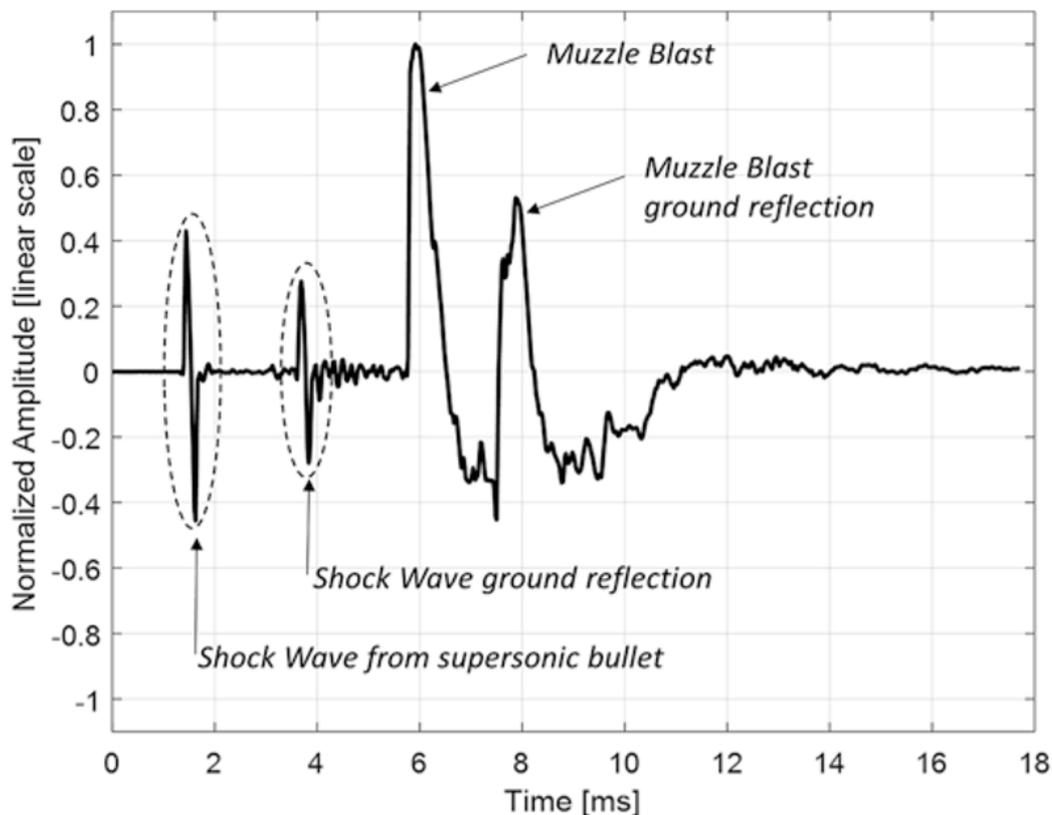


Figura 11. Oscilograma que representa los fenómenos acústicos de disparo de arma de fuego. Obtenida de Robert Maher [20]

Entonces, usando el retardo entre las señales de cada canal, una fuente puede ser localizada.

Como se representa en la Fig. 12, si el medio es homogéneo y estable, cada frente de onda emitido por una fuente F viajará a una velocidad  $c$ . Además, si el entorno carece de materiales que provoquen fenómenos de reflexión o transmisión, los frentes de ondas serán esféricos. Si el micrófono  $M_2$  se encuentra más cerca de la fuente que el micrófono  $M_1$ ; implica que las distancias guardan la relación:  $FM_2 < FM_1$ . Además que el sonido alcanza a  $M_2$  primero, luego a  $M_1$ . De modo que el radio  $b$  es menor al radio  $a$ . El retraso temporal de cada canal, permite obtener la diferencia entre las distancias.

$$a - b = v \Delta t = FM_1 - FM_2 \quad (2.8)$$

de la que el sonido proviene (ángulo theta) en el punto medio entre la distancia entre micrófonos  $M_2$  y  $M_1$

Digamos que tenemos una grabación estéreo de una sola fuente omnidireccional, propondremos un algoritmo para calcular el azimuth utilizando la diferencia de tiempo intercanal.

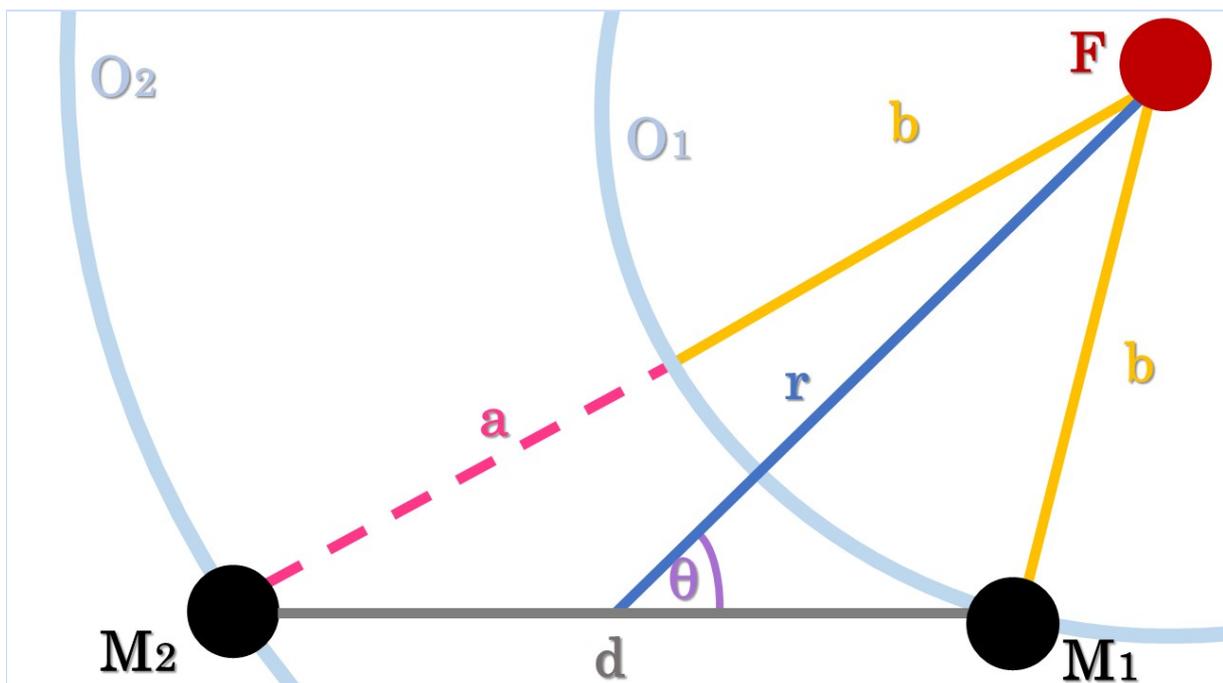


Figura 12. Determinación del ángulo theta a través del tiempo de retardo de señales entre dos micrófonos. En donde: F representa a la fuente sonora,  $M_1$  y  $M_2$  representan los sensores,  $O_1$  y  $O_2$  representan los frentes de onda para cada uno de los sensores,  $b$  la distancia de F a  $M_1$ ,  $d$  es la distancia entre  $M_1$  y  $M_2$ ,  $a$  en líneas punteadas color rosa representa diferencia de distancias entre  $M_1$  y  $M_2$  y  $\theta$  es el ángulo que nos indica la direccionalidad hacia la fuente de sonido.

Considerando el diagrama de la Fig. 12. La fuente de la señal se encuentra en las coordenadas  $(x, y)$ , el micrófono de la izquierda se encuentra en  $(-1, 0)$ , el micrófono de la derecha en  $(+1, 0)$ . Entonces,  $d = 2$  es la distancia entre los dos micrófonos,  $b$  es la distancia de la fuente al micrófono de la izquierda y  $a$  es la distancia de la fuente al micrófono de la derecha. La diferencia de  $a$  respecto de  $b$  es la distancia extra para alcanzar al micrófono de la izquierda, que es el que provoca el retraso el tiempo de arribo y decremento en la amplitud. La circunferencia gris representa el frente de onda cuando alcanza el micrófono de la derecha.

- El retraso (diferencia de tiempos) entre los canales debe ser  $T = a / c$ , donde  $c$  es la velocidad del sonido.
- como los micrófonos son sensores de presión [59] , que disminuye con el inverso de la distancia (ley  $1/r$ ), la amplitud de la señal en el micrófono izquierdo es

$G = \frac{b}{a+b}$  veces la señal del micrófono derecho (su razón de nivel, no su diferencia de niveles).

Si son conocidos  $T$  y  $G$ , se puede encontrar  $b$ :

$$b = \frac{GTc}{1-G} \quad (2.9)$$

Entonces se puede conocer  $b$  y  $a+b$  y utilizando la ley de cosenos [60] y el teorema de Apolonio [61] para la la mediana de un triangulo, se puede encontrar  $r$  y  $\theta$ :

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{4b^2 + 4ab + 2a^2 - d} \quad (2.10)$$

$$b^2 = -dr \cos(\theta) + r^2 + \frac{d^2}{4} \quad (2.11)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{r}{d} + \frac{d}{4r} + \frac{b^2}{dr}\right) \quad (2.12)$$

Entonces unimos  $a$  y  $b$ , y simplificamos:

$$r = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2(Tc)^2(G^2 + 1)}{(G-1)^2} - d^2} \quad (2.13)$$

$$\theta = \arccos\left(\frac{r}{d} + \frac{d - (GTc)^2}{4r(1-G)^2 dr}\right) \quad (2.14)$$

Si únicamente se conoce  $T$ , entonces la fuente se supondrá sobre una hipérbola (mostrada en línea color verde) con los puntos focales en los micrófonos. Si solo se conoce  $G$ , entonces se colocará la fuente sobre un círculo (mostrado en color naranja de la Fig.13. La intersección de estas dos curvas es la localización de la fuente. Debemos hacer notar que la precisión disminuye cuando los ángulos son pequeños.

Ahora bien, si la fuente se encuentra muy alejada, asumimos la condición de campo lejano, es decir  $a \ll b$ , de modo que  $G$  tiende a 1. En tal situación solo se puede estimar el ángulo, no la distancia, utilizando:

$$T = \frac{d}{c} \cos(\theta) \quad (2.15)$$

donde  $d$  es el espacio entre los micrófonos,  $c$  la velocidad del sonido y  $T$  tiempo de retardo.

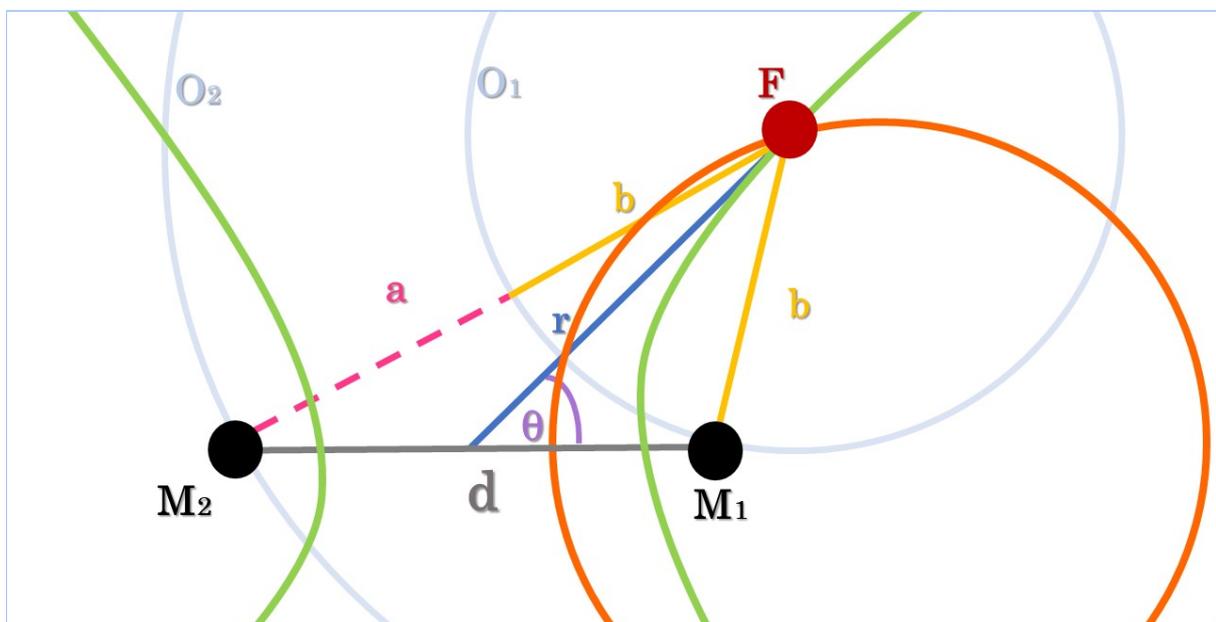


Figura 13. Esquema que representa la intersección de dos curvas para ubicar la fuente sonora. En color verde se observa una hipérbola cuyos focos corresponden a las posiciones de los sensores y en color naranja un círculo que se obtiene al conocer el valor de  $G$ .

### **Método alternativo en futuros trabajos**

Un método simple para obtener el tiempo de retraso es mediante el cálculo de la correlación de las señales. En el dominio de frecuencias:

$$Z(\omega) = L(\omega) * R(\omega) \quad (2.16)$$

donde  $L(\omega)$  y  $R(\omega)$  son los espectros de frecuencia de los micrófonos de la izquierda y la derecha. Al tomar el inverso se obtiene  $z(t)$ . Entonces el máximo valor en la magnitud de  $z(t)$  el tiempo en que sucede este máximo da el tiempo de retardo.

Esta última fórmula no se utilizara en esta tesis, sin embargo, no se descarta que podría emplearse en otras situaciones.

## 2.6 Geolocalización de teléfonos celulares y extracción de su información

Actualmente, el empleo de dispositivos móviles es una tendencia sobre otros aparatos como las computadoras de escritorio, en parte por sus precios y gran facilidad para transportarlos, aunado a la variedad de funciones y aplicaciones que estos contienen. En nuestro caso, denominamos dispositivo móvil aquel instrumento que puede conectarse y operar a través de una red móvil.

Si bien, el concepto dispositivo móvil cubre una amplia variedad de equipos electrónicos, nos centraremos en los teléfonos móviles o comúnmente llamados celulares. Así, excluimos tecnologías específicas que sí distingue el perito en delitos cibernéticos. Por ejemplo, paginadores, comunicadores de bolsillo, *Internet screen phones*, sistemas de navegación de automóviles, sistemas de entretenimiento, sistemas de televisión e Internet (WebTV), entre otros. En nuestro enfoque pragmático, a todos ellos los colocamos en la misma categoría de dispositivo móvil.

Así, definimos como teléfono móvil al dispositivo electrónico inalámbrico cuya tecnología se basa en la emisión y recepción de ondas radio. Si bien su principal función es la comunicación, debido al gran auge tecnológico, se ha logrado incorporar a éste una versatilidad de funciones como: juegos, reproductores de audio y video. Además, suelen contar con accesorios tecnológicos, tales como: cámaras fotográficas, giroscopios, acceso a Internet e incluso receptores de GPS.

En nuestro día a día, de modo consciente o no, reportamos nuestra ubicación geográfica a través del teléfono celular, ya sea al momento de realizar una llamada o por medio de las diferentes aplicaciones instaladas en el dispositivo, mismas que registran nuestra ubicación en tiempo real. Existen pues, tres formas para determinar la ubicación de un dispositivo móvil: GPS, triangulación y puntos de acceso. A continuación, ahondaremos la explicación de estas tres herramientas.

### **a) GPS Sistema de Posicionamiento Global, por sus siglas en inglés (*Global Positioning System*).**

El GPS fue diseñado inicialmente para uso militar. Por estándar, está conformado por 27 satélites [62]. Los teléfonos inteligentes y los dispositivos GPS poseen un receptor GPS incorporado. Cuando el dispositivo GPS o el celular se conecta con al menos tres satélites, el receptor GPS identifica su distancia entre satélites y a través de ello trata deducir su posición mediante un proceso matemático conocido como trilateración. Los receptores GPS generalmente muestran una precisión de 4.9 m, según las condiciones atmosféricas y terrestres [63]. En la actualidad, se considera el GPS entre las tecnologías más precisa de ubicación en áreas kilométricas. Sin embargo, su obtención es un poco lenta, no funciona adecuadamente en espacios cerrados, por lo que el dispositivo móvil debe hallarse en un

lugar abierto con la finalidad de que la antena GPS sea receptiva. Además, el usuario debe mantener activado el módulo GPS.

### **b) Triangulación de Torres celulares**

Es otra técnica empleada para determinar la ubicación de un teléfono o dispositivo. Cuando la señal del teléfono es captada por tres o más torres celulares, se realiza un cálculo del tiempo de retraso relativo entre torres y la distancia entre ellas, con lo que se obtiene la distancia del teléfono desde cada una de las torres, permitiendo estimar las coordenadas geográficas del celular, pues se conocen la ubicación de las torres. A medida que el celular se conecta a una mayor cantidad de torres, la precisión mejora.

En áreas urbanas, las torres de telefonía celular se encuentran más juntas, por lo que la estimación de la posición del celular será mucho más precisa, en comparación a un área rural en donde las torres se encuentran más separadas. Sin embargo, si la torre celular más cercana se encuentra ocupada por otra señal, entonces la señal será captada por la siguiente torre más cercana, disminuyendo la precisión de su ubicación. La precisión promedio de esta técnica puede variar entre 500 y 1500 m [63].

### **c) Puntos de Acceso Wi-Fi**

Los teléfonos tienen un servicio de ubicación en segundo plano, que busca constantemente puntos de acceso a Wi-Fi. Así como el envío de direcciones Wi-Fi y la ubicación (identificada a través de GPS o la triangulación de torre celular) a sus respectivos servidores. Esto permite a compañías, entre las que se encuentran Google y Apple, determinar la posición del usuario al hacer la detección de la potencia de las señales Wi-Fi del teléfono. Sin embargo, las posibles variaciones de señal entre el teléfono y el punto de acceso puede generar una imprecisión en la ubicación del usuario. En un corte de energía la detección de la señal Wi-Fi puede no ser posible. La precisión de esta técnica puede variar entre 10 y 25 m en una ciudad muy poblada y en áreas urbanas con menos puntos de acceso varía entre 20 a 100 m [63].

Estas formas de obtener la ubicación de la fuente de una señal son similares al método que proponemos en esta tesis para encontrar a un tirador, pero en lugar de utilizar una señal electromagnética, empleamos la señal acústica del arma de fuego.

Como ya se mencionó, existen diferentes métodos que permiten determinar la posición de un usuario, cada una presenta sus ventajas y desventajas. El examinador deberá contemplar estos métodos para resolver el problema, empleando aquella en la que se obtenga una mayor y mejor calidad de información. Conocer la ubicación de un dispositivo móvil en el momento que llevó a cabo el registro acústico del disparo, permitirá más adelante efectuar los cálculos matemáticos, ya antes mencionados que permitan determinar la posición del tirador.

## 2.5.1 Herramientas forenses de utilidad en el análisis de dispositivos móviles

Para garantizar la integridad de la información recolectada del teléfono celular -en este caso nos interesa el audio que registró hecho- el perito en informática deberá realizar el análisis forense adecuado, valiéndose de diferentes herramientas y técnicas. Siendo que el proceso para la extracción de información de un dispositivo móvil es diferente al de una computadora, se han desarrollado diferentes herramientas que permiten llevarlo a cabo.

Para efectuar la extracción de información es necesario que el examinador conozca las diferentes herramientas para la adquisición de datos, sus ventajas y sus limitaciones. La clasificación de las herramientas se ha efectuado a través de una pirámide, dividida en 5 niveles de acuerdo al grado de complejidad y al costo de las técnicas aplicadas [64].

- **Nivel 1.** Implica el registro de información obtenida a través de la pantalla del dispositivo móvil cuando se emplea la interfaz de usuario.
- **Nivel 2.** Se requiere un nivel técnico y la capacitación a nivel principiante. Debe emplearse controladores y software específicos al tipo de dispositivo sujeto a análisis, siguiendo el protocolo del fabricante.
- **Nivel 3.** Se requiere una capacitación avanzada para efectuar este tipo de técnicas, se realiza *in situ* la extracción física de la memoria del dispositivo móvil.
- **Nivel 4.** En este nivel se requiere una capacitación en ingeniería electrónica y análisis forense de sistemas de archivo. Efectuándose la eliminación física de la memoria del dispositivo móvil para la extracción de información.
- **Nivel 5.** Se efectúa una micro lectura del dispositivo, lo que conlleva el empleo de métodos más invasivos, técnicos, sofisticados, costosos y que requieren de un mayor tiempo.

El examinador debe conocer las características de las herramientas que emplea para la extracción de información, así como su nivel de capacitación y experiencia. Cada uno de los procedimientos puede llevar a la destrucción o a la modificación de los datos, si éstos no se emplean adecuadamente. El riesgo de destrucción o alteración aumenta conforme se aumenta el nivel. Por ende, una buena capacitación permitirá obtener un resultado de extracción de datos y análisis de los mismos más exitoso.

La siguiente es una lista de los principales productos disponibles para el análisis y la extracción de información de dispositivos móviles, la mayoría centrados en el nivel 2 (extracción lógica):

- *Paraben Device Seizure (Paraben Corporation)*
- *UFED (Cellebrite Universal Forensic Extraction Device).*
- *CellDEK (Logicube)*
- *Mobilyze (BlackBag Technologies)*
- *BitPim (Open source free application)*

El listado anterior son algunas de las herramientas que el perito informático podría utilizar, existen más de estas. En esta tesis nos concentramos solamente en señalar los retos y alcances de la técnica propuesta para identificar al tirador, por lo que no desarrollaremos por completo el ambiente operativo, eso corresponderá a otra publicación.

# CAPÍTULO 3: MATERIALES, MÉTODOS Y RESULTADOS

## 3.1 Mediciones de impulsos sonoros

### 3.1.1 Propuesta experimental

Como se ha mencionado en capítulos anteriores, existen diferentes métodos, técnicas e instrumentos que pueden auxiliarnos a determinar la posición u origen de un disparo. Una de esas formas para determinar la posición de la fuente del sonido es a través de la intensidad. A continuación, se hará mención de dos mediciones experimentales en diferentes espacios: abierto y cerrado. Esperando que, de acuerdo a la teoría, el nivel de intensidad capturada por el sensor pueda orientarnos a determinar la posición de la fuente de sonido. Para ello se realizaron diferentes pruebas a modo experimental que a continuación explicaremos a detalle.

Nuestro primer ensayo empírico –experimento– se realizó en un espacio abierto, el día 3 de septiembre de 2018, siendo las 11:19 am, esto en la explanada de la Sede de la Licenciatura en Ciencia Forense ubicado en Circuito de la Investigación Científica s/n entre Dirección General Administrativa Escolar y la estación terminal C.U. del Metro. Del. Coyoacán C.P. 04510 México D.F.

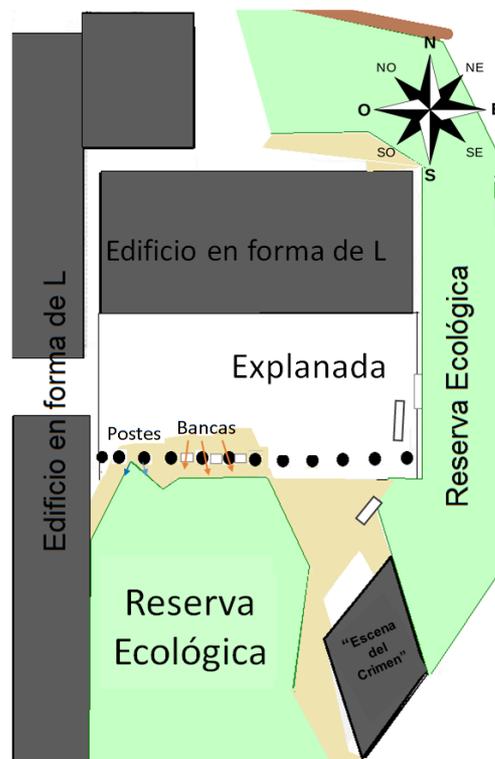


Figura. 14. Croquis de la sede de la Licenciatura en Ciencia Forense.

La explanada de la sede presenta las siguientes características: El lado norte y oeste se encuentra ocupado por un edificio de tres niveles en forma de L ; en el lado sur se ubican trece postes metálicos, 3 bancas de concreto y parte de la reserva ecológica, mientras que, en el lado este se puede visualizar una banca de concreto, así como, parte de la reserva ecológica del lugar. En Fig. 14., se observa la distribución de los elementos que conforman el lugar.

En la Fig. 15., se esquematiza cómo el suelo de la explanada se dividió en 36 franjas con cinta adhesiva, a cada cinta se le asignó un número del 0 al 36. El sentido de la numeración va en sentido este a oeste, en línea recta. La separación entre cada franja fue de 4 losetas siendo que, cada loseta mide 30 cm de longitud, la distancia de separación es de 1.20 m. Posteriormente, se solicitó a 36 alumnos colocarse sobre cada cinta, de acuerdo a la numeración marcada en el suelo; es decir, del 1 al 36 y que, con apoyo de sus equipos telefónicos llevará a cabo el registro de la detonación del globo. El punto cero, ubicado en el borde de la explanada, se colocó una persona para reventar el globo. Cabe señalar que, las condiciones del lugar eran buenas, ya que no había otro ruido externo que pudiera afectar y no había presencia de viento.



Figura 15. Esquema que representa la colocación en fila de los alumnos para realizar la audio-grabación.

Posteriormente, siendo las 11:52 am, se realizó la segunda parte de la experimentación, esta vez en un espacio cerrado: el aula digital el cual se ubica en el tercer piso del edificio principal de la sede. Se trata de un lugar cerrado ocupado por 37 mesas distribuidas en tres hileras, tal y como se muestran en la Fig. 16. Las puertas y ventanas del aula se encontraban cerradas con la finalidad de que ruidos externos no interfirieran en la audio-grabación.

Se colocaron tres cintas sobre el suelo, estos representarán los puntos en donde se reventaran los globos. Los tres puntos se han denominado con las siguientes letras: X, Y y Z. El punto identificado con la letra X se ubica a frente a la puerta de acceso a 13 losetas de distancia. El punto Y se ubica a 17 losetas de separación respecto del punto X, en dirección de norte a sur, ubicándose entre la primera y segunda hilera de mesas. El punto, Z se encuentra a 17 losetas de separación respecto el punto Y, en dirección de norte a sur, y a dos losetas. Se solicitó a cada alumno colocarse en cada una de las mesas numeradas. A su vez, los alumnos colocaron sus dispositivos telefónicos en la base del monitor.

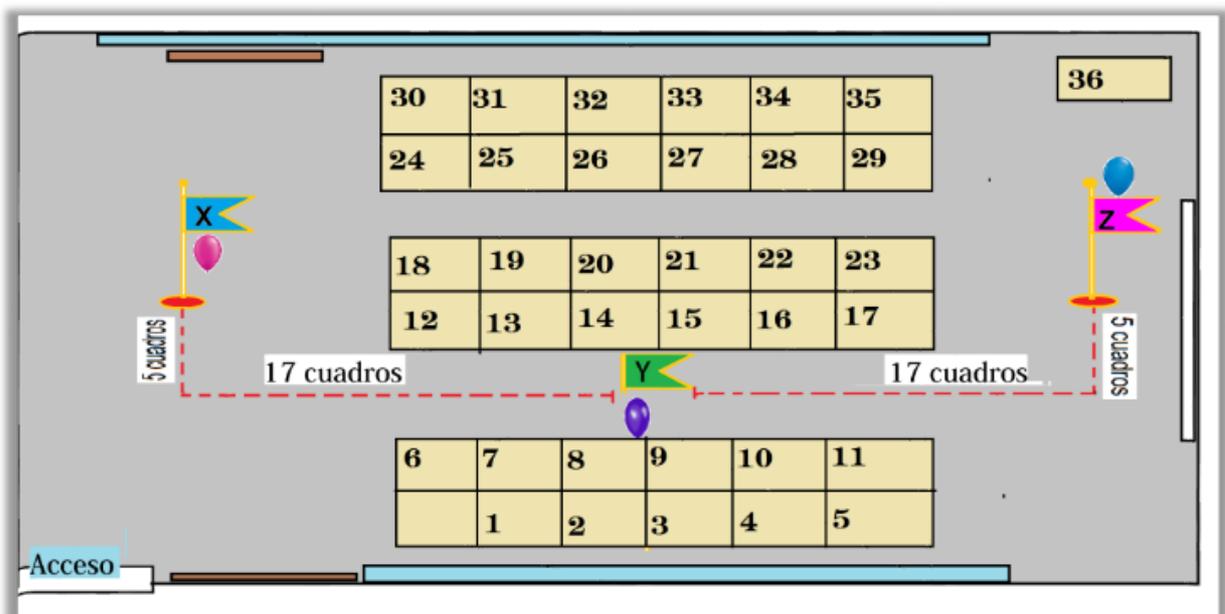


Figura 16. Esquema que representa la ubicación de los 36 alumnos en aula digital.

Finalmente, se solicitó a los alumnos qué enviaran sus grabaciones por correo electrónico a una dirección particular, desde donde las señales fueron recopiladas. Posteriormente, fueron analizadas mediante el software *Octave*, permitiendo conocer las características de intensidad de cada uno de los audios registrados

### 3.1.2 Resultados parciales

A continuación se hará mención de los resultados obtenidos.

En la Fig. 17, podemos visualizar el comportamiento de los niveles de intensidad registrados por los dispositivos móviles en función de la distancia de separación con la fuente de sonido.

Teóricamente esperaríamos un comportamiento de una curva, ya que la intensidad del sonido es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia. A medida que el sensor se encuentre más alejado de la fuente emisora, la intensidad del sonido disminuirá. Sin embargo, la gráfica muestra un comportamiento diferente, como el de una letra *s* alargada. Si bien, se observa que la intensidad muestra un comportamiento descendente conforme se incrementa la distancia, los niveles de intensidad son casi similares cuando los sensores se ubican en un intervalo de 10 a 20 m.

Se muestra una ecuación donde:  $y$  es la presión sonora,  $x$  es la distancia entre la fuente de sonido y el micrófono.

En la Fig. 18, se observan los valores de intensidad relativa obtenidos de la señal acústica capturada por el dispositivo móvil, mismos que fueron ajustados a una escala logarítmica.

Posteriormente, añadimos una línea de tendencia lineal, y cuyo coeficiente de correlación lineal de 0.9431, indicando que existe una relación entre la distancia y la intensidad relativa, es decir, se observan cambios en el nivel de intensidad conforme se incrementa la distancia de separación entre sensor y el globo.

Por las características de la pendiente, se observa que los niveles de intensidad poseen un tendencia decreciente, es decir, va disminuyendo conforme la distancia aumenta. Sin embargo su valor es de -0.0239. en este caso, la gráfica no tiene el comportamiento de una línea recta decreciente con valor de pendiente de -1, sino más bien el de una curva

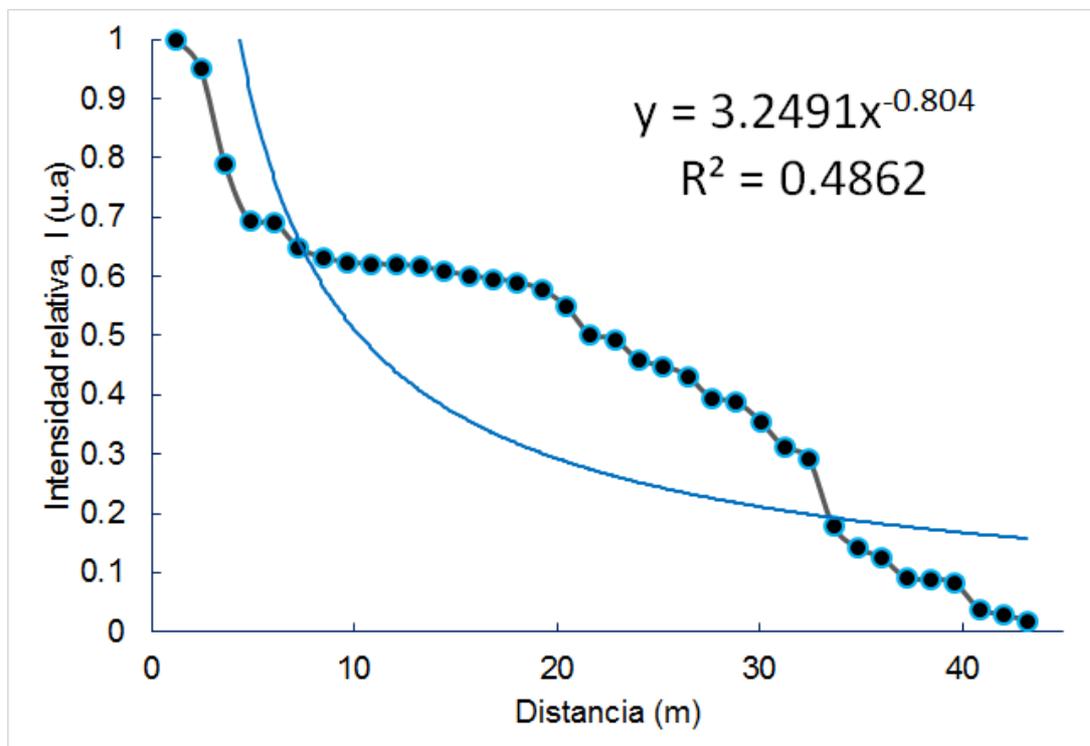


Figura 17. Gráfica que representa los niveles de intensidad en función de la distancia.

Ante los resultados presentados, debemos asumir de que existe un alto grado de incertidumbre pues existen varios factores que afectan considerablemente los resultados. Por mencionar algunos, se encuentran:

- a) La fuente de sonido es un globo, carece de algún tipo de calibración que nos permita conocer con precisión el nivel de presión sonora.
- b) Algunos teléfonos celulares, poseen una función llamada AGC (Control de Ganancia Automática) que permite mejorar la calidad del audio. Cuando la señal de sonido es baja, esta función aumenta el nivel de intensidad de la señal. Cuando la señal es demasiado alta, la función la atenúa. Esto algunas veces se le llama compresión del sonido
- c) La sensibilidad del micrófono, considerando que existen diferentes modelos de celulares.
- d) La ubicación, la posición, la orientación en la que fue colocado el celular. Por ejemplo, algunos alumnos colocaron el celular con el micrófono dirigido hacia el globo, por lo tanto, la señal capturada podría ser de mejor calidad en comparación de aquellos quienes orientaron el micrófono en otra dirección o incluso que pudieron haberlo cubierto con la mano.

En cuanto al espacio cerrado, las características del lugar tienen efectos en la señal debido a los diferentes fenómenos acústicos que se produjeron, como las reverberaciones las reflexiones del sonido. Sin embargo, puede ser una fuente de información que nos permita determinar la posición del tirador. Los resultados obtenidos se pueden visualizar en el apéndice G.

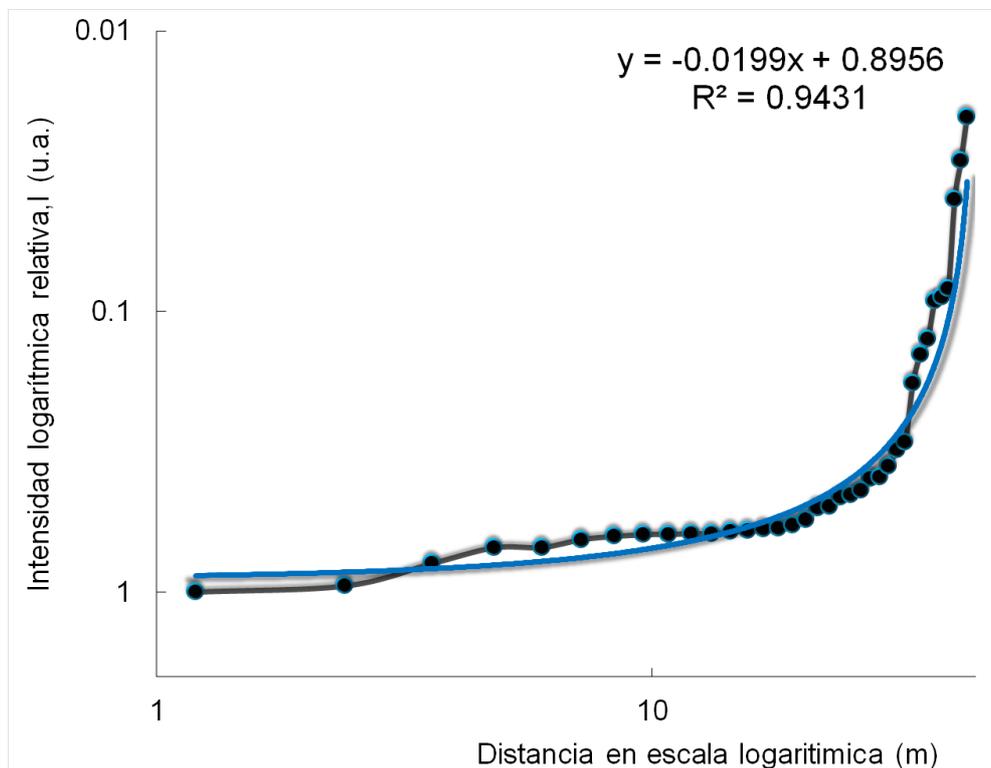


Figura 18. Niveles de intensidad relativa en escala logarítmica obtenidos en espacio abierto.

## 3.2 Construcción de sistema portátil de caracterización acústica para dispositivos de audio-grabación

Sabemos que en propagación libre la presión sonora es inversamente proporcional a la distancia, como lo describe el capítulo 2. Marco Teórico. Esto sugiere que si se conoce la intensidad emitida, se puede determinar la distancia fuente-micrófono con solo analizar la intensidad de la onda sonora.

Sin embargo, los micrófonos son transductores que varían en su calibración por diversas causas. Por ejemplo, en el mercado existe una extensa gama de componentes para micrófonos, de diferentes precios y calidades electrónica-sonoras; con el fin de que el fabricante seleccione la que mejor le convenga a su producto. Entonces, si dos *smartphones*, de diferentes modelos, se colocan a una misma distancia relativa a una fuente sonora; pueden mostrar una intensidad distinta. Por tanto, si se carece de calibración del dispositivo, la determinación distancia de la fuente sonora vía el análisis de la intensidad será incorrecta. Por ello, proponemos la construcción e implementación de una caja acústica que permita realizar de modo rápido y aceptable tal calibración. Para efectos de este proyecto se construyeron dos cajas con diferentes materiales. A continuación, mencionamos los detalles técnicos de ellas.

La primera caja acústica está conformada por una caja de cartón para embalajes generales. Sus dimensiones son: 52 cm de largo, 36 cm de ancho y 26 cm de altura; sus paredes internas, así como base y tapa fueron recubiertas de con una placa acústica de espuma de poliuretano en forma piramidal. La espuma de poliuretano, es un material que se caracteriza por tener típicamente un alto coeficiente de absorción acústica, permitiendo una alta absorción de las ondas sonoras. Además, la forma piramidal (cuñas anecoicas), permite que la onda incidente se refleja en la cuña contigua; con lo que aumenta la superficie efectiva de absorción. De tal modo, los fenómenos acústicos de la reverberación y el eco fueron disminuidos en el registro de la señal acústica. En la Fig.19 se visualiza una fotografía de la primera caja.

En el interior de la caja, en uno de los extremo izquierdo se colocó una pequeña bocina –que originalmente era parte de un audífono de diadema–, de acuerdo al fabricante cuenta con una respuesta óptima a una frecuencia entre 20-10,000 Hz y una potencia máxima de 50 mW, este fue la fuente sonora. Esta primera caja representó un prototipo inicial para realizar las caracterizaciones acústicas iniciales en los teléfonos celulares. Sin embargo, pronto decidimos mejorar la caja, con el fin de obtener una caracterización más fidedigna.

La segunda caja acústica construida está conformada por dos cajas (una dentro de la otra) de madera de mediana densidad MDF de diferentes dimensiones, ambas cuentan con un grosor de 12 mm. La caja grande (caja exterior) mide 50 cm de largo por 32 cm de ancho y 32 cm de altura. La caja pequeña (caja interior) mide 46 cm de largo por 28 cm de ancho y 28 cm de altura. Las dos cajas cuentan con tapa. La caja pequeña se introdujo dentro de la

grande, con una separación entre paredes de 1 cm, este espacio fue relleno con lana mineral de 2 pulgadas de grosor y  $16 \text{ lb/m}^3$  de densidad. Dicho material suele emplearse en la industria de la construcción de casas para obtener aislamiento térmico y acústico. Las cajas de madera brindan mayor masa que la caja de cartón, por lo que su inercia contra vibraciones de baja frecuencia es mejor. Por su parte, el aislante de lana mitiga el efecto de algunas vibraciones externas de la caja acústica. Finalmente, el interior también se recubrió con espuma acústica de poliuretano. Las fichas técnicas de los materiales empleados se encuentran en el apéndice F.

En interior de esta caja, en el extremo derecho, se colocó la fuente de sonido: un altavoz (marca Logitech, modelo Z150), de acuerdo con el fabricante su transductor mide  $5 \times 5 \text{ cm}$  y tiene un rango de frecuencias de 150 Hz a 20 kHz. En la Fig. 20, se presenta una fotografía de la segunda caja acústica.

En la función de receptor del sonido (para ambas cajas) se utilizó un equipo celular (marca: Motorola, modelo: Moto C Plus, Sistema Operativo: Android 7.0). Este fue el receptor de la señal para ambas cajas. En ambos casos, el celular se colocó en un extremo de caja. En un inicio, para la caja de cartón, el celular se colocó horizontalmente a una altura de 20 cm respecto de la base de tal manera que el micrófono estaba en dirección a la fuente de sonido. En el caso de la segunda caja, el celular se colocó verticalmente, sobre la base del piso de la caja con el micrófono dirigido hacia la base de la caja.



Figura 19. Caja acústica construida utilizando una caja de cartón y recubierta en sus paredes, base y tapa internas con espuma acústica de forma piramidal.

Para ambas cajas, la señal acústica fue generada a través de un software de licencia *creative commons* llamado “*Two Channels Frequency Generator v.1.2*”. Es una herramienta muy utilizada en los laboratorios de física y acústica, ya que, permite el control de volumen, fase y frecuencia de los canales izquierdo y derecho, admite sonidos a frecuencias de 20 a 20,000 Hz.. Aunque puede generar una gran cantidad de frecuencias, el programa depende de la capacidad de salida de la tarjeta de sonido. La Fig. 21 presenta la pantalla de trabajo del programa de cómputo.

Como ya se mencionó, el programa permite generar frecuencias para ambos canales, de modo que las fuentes de sonido solo trabajaron con uno de los canales. Así, los parámetros de un canal se manipularon y el otro se mantuvo en silencio constante. En este caso, solo se generó sonido en el altavoz izquierdo.

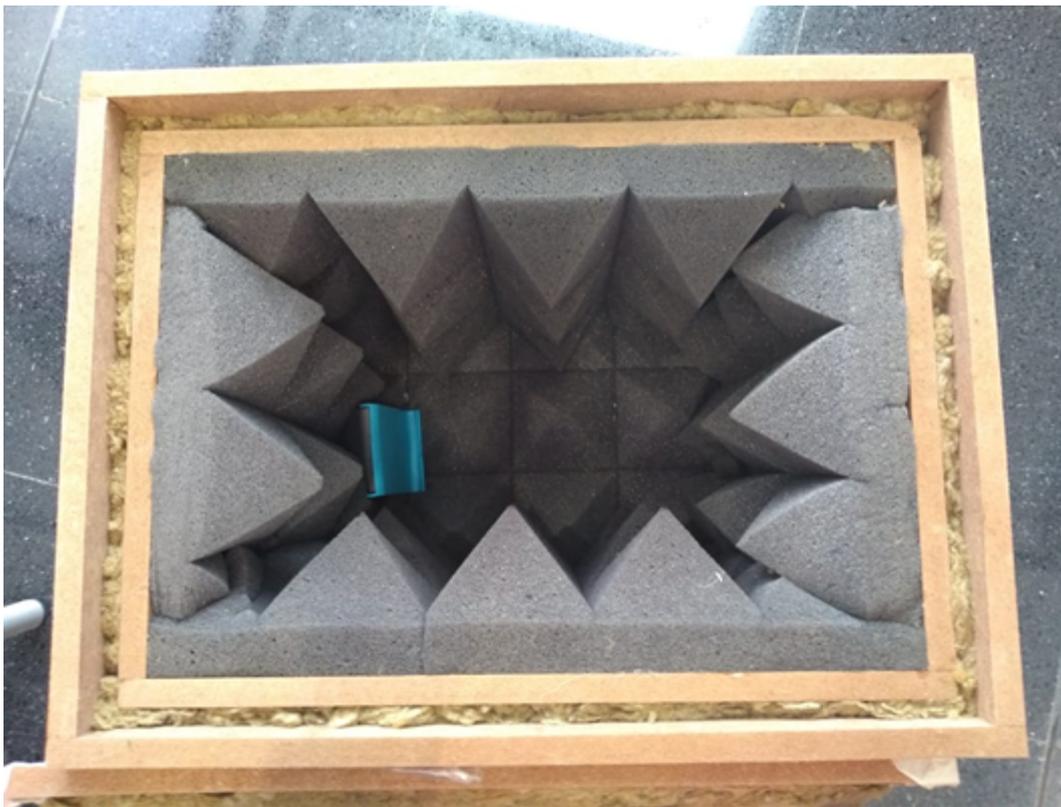


Figura 20. Fotografía de la segunda caja acústica, en esta se observa la distribución de los materiales de construcción. En la imagen no se muestra la bocina (fuente de sonido).

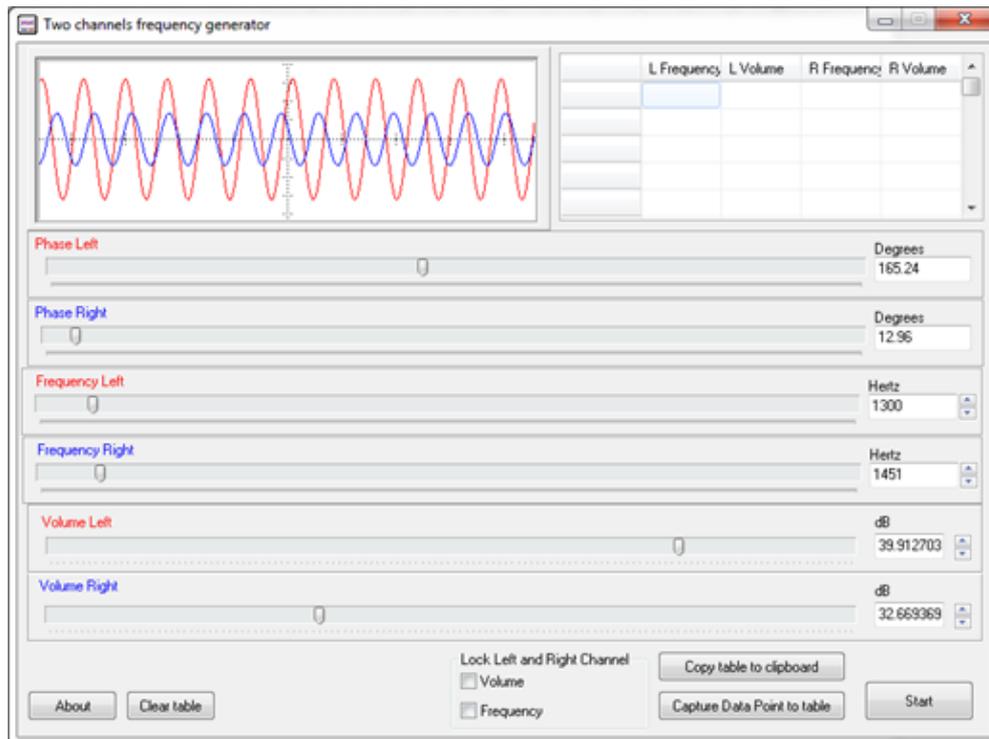


Figura 21. Ventana de inicio del programa “Two channels frequency generator”.

Para obtener una mejor caracterización primaria de la respuesta del *smartphone*, se utilizaron tres frecuencias: **1)** 250 Hz (tono grave), **2)** 2,000 Hz (tono medio) y **3)** 20,000 Hz (tono agudo). Estas frecuencias las escogimos porque representan, de acuerdo con la clasificación del espectro de sonido audible, los umbrales de las zonas de trabajo. También, se eligió de forma aleatoria la frecuencia de 7,000 Hz (tono medio).

Lo que se espera de este experimento es que la señal acústica registrada por el teléfono móvil posea las mismas características (en frecuencia) de la señal generada a través del programa generador de sonidos, ya que la grabación se realizará en un espacio donde los fenómenos acústicos no interfirieran. Sin embargo, se debe considerar que el celular puede que no realice un registro de buena calidad, siendo este el objetivo principal del experimento: caracterizar la señal acústica registrada por el dispositivo.

### 3.2.1 Resultados de la primera caja

A continuación, presentamos y explicamos los resultados de cada una de las señales de audio registradas en la primera caja:

La Fig. 22 A) muestra la respuesta del sensor al ser estimulado a una frecuencia de 250 Hz. El oscilograma, en sus primeros 0.5 s, presenta variaciones muy irregulares en su amplitud relativa. Después, parece que muestra batimientos; es decir, interferencia de dos ondas sonoras con frecuencias muy cercanas, además de contener efectos de ruido. En la Fig. 22 B) se presenta el espectro de esta señal, el pico más alto (que se diferencia bien del resto) cuenta con una frecuencia de 120 Hz. Otro pico notable se encuentra alrededor de 127 Hz, es muy probable que influya la formación de los batimientos. De modo menos importante, encontramos otras frecuencias entre los 10 y 500 Hz. En la Fig. 22 C) se observa un acercamiento del espectro de frecuencias, mostrando el pico de frecuencia a

120 Hz. Si bien, el dispositivo no registró correctamente la frecuencia que generamos a través del programa, la presencia de un pico a 120 Hz. nos indica que posiblemente esto se debió al registro de las líneas de potencia eléctrica, cuyos valores oscilan en un intervalo de 60 a 120 Hz. O posiblemente se debió a las características del equipo, al tratarse de una caja de cartón, absorbió bajas frecuencias como la de 250 Hz.

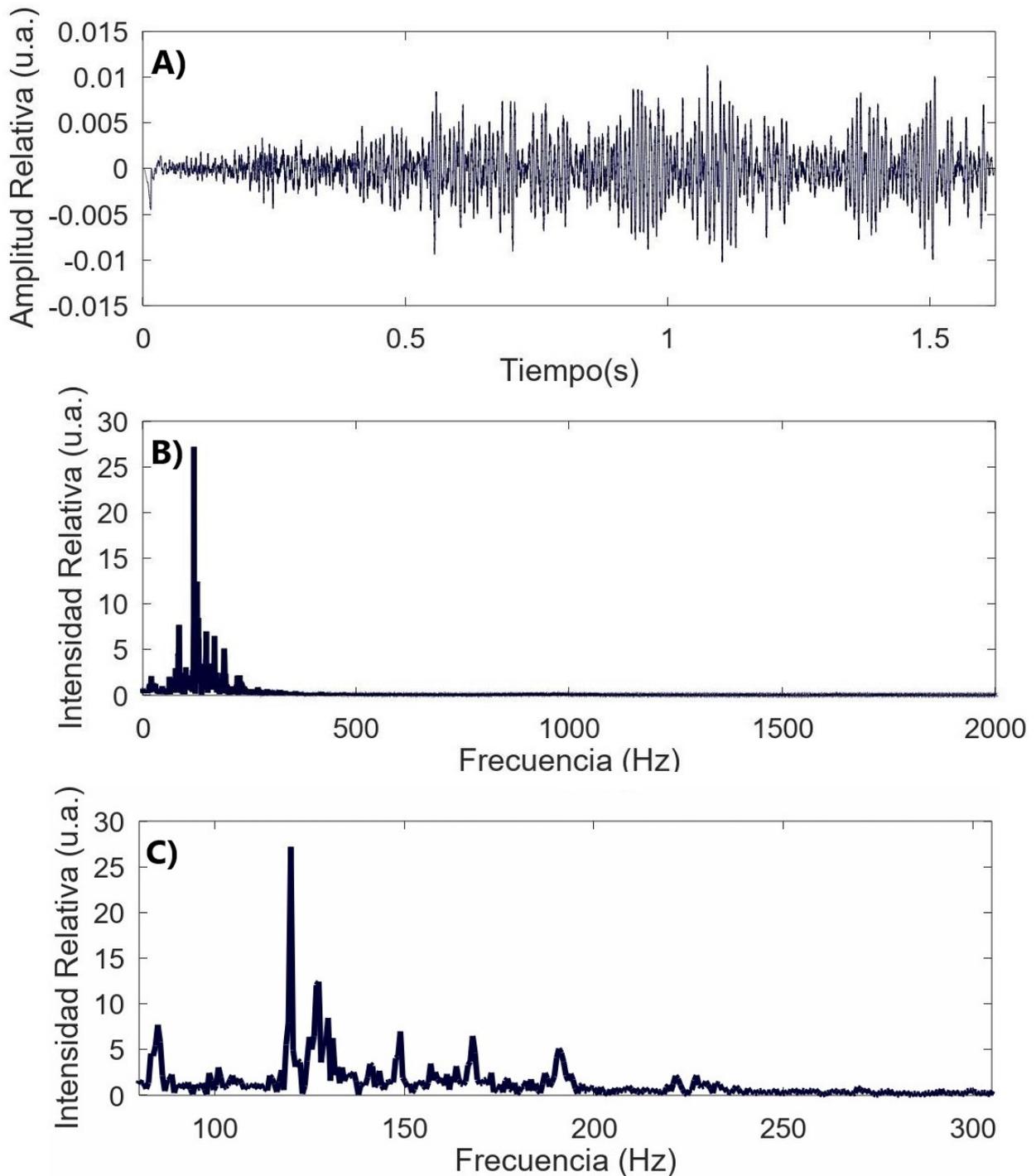


Figura 22. Se pueden visualizar los siguientes elementos: **A)** Oscilograma, **B)** Espectro de frecuencias y **C)** Acercamiento del espectro. Los gráficos corresponden a la respuesta del sensor a una frecuencia de 250 Hz. Obtenido de las mediciones en la primera caja.

En la Fig. 23 A) se presenta la respuesta del sensor ante una frecuencia 2,000 Hz. Se observa una señal muy estable, con una amplitud constante. Casi al final del registro, cerca de los 1.5 s, se muestra el efecto de tocar la tapa de la caja para abrirla, observándose una oscilación de alta amplitud y poca duración. En la Fig. 23 B) se presenta el espectro de frecuencias de este caso. Se observa claramente un pico de frecuencias de 2,000 Hz, siendo este el valor esperado. Sin embargo, se observan pequeños picos alrededor los 200 Hz, que revelan el contacto de la mano con la tapa de caja acústica.

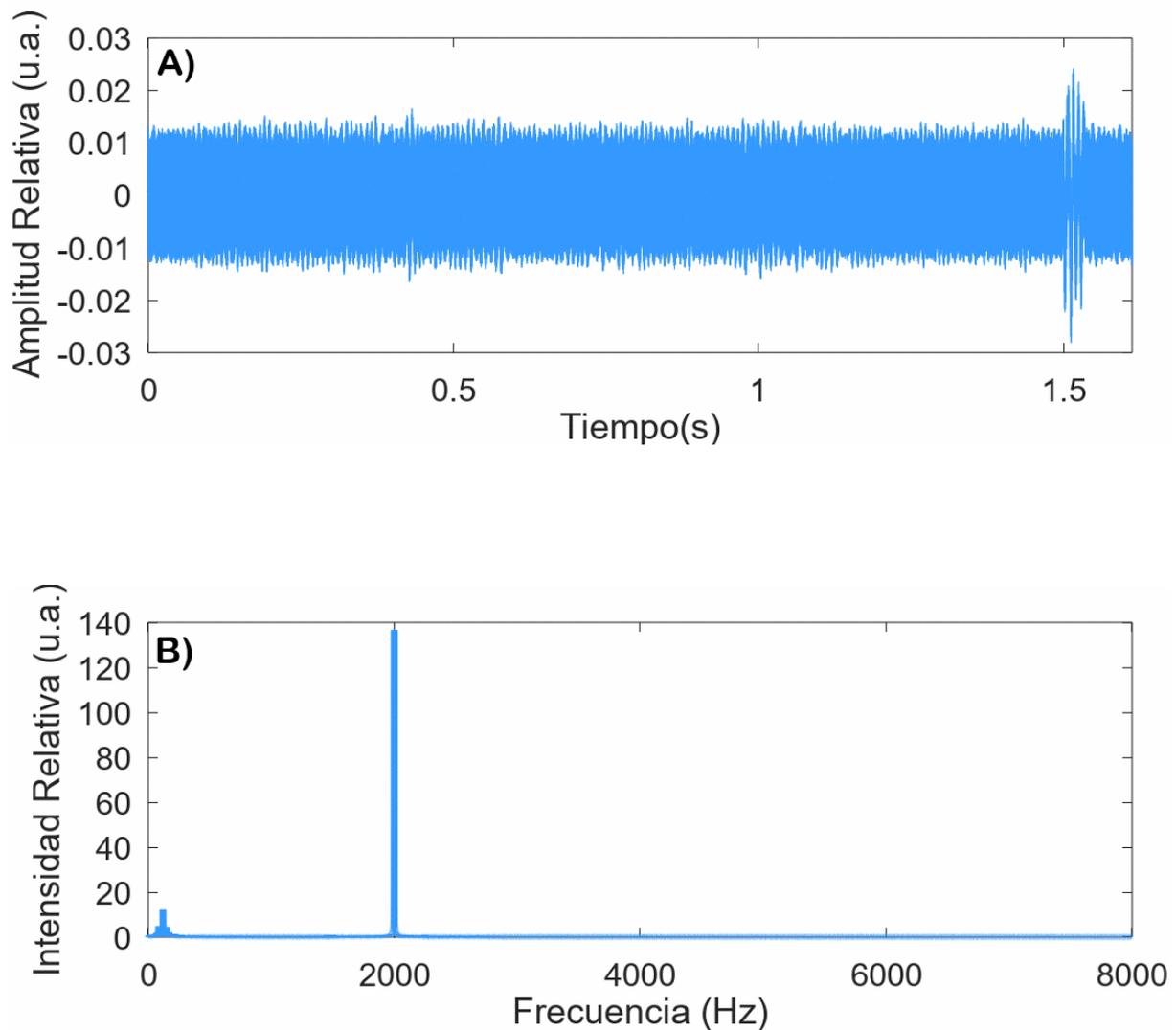


Figura 23. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma, **B)** Espectro. Los gráficos corresponden a la respuesta del sensor a una frecuencia de 2,000 Hz. Obtenido de las mediciones en la primera caja.

La Fig. 24 A) muestra el oscilograma obtenido al excitar el sistema a 20,000 Hz de frecuencia. El resultado, una señal distorsionada con demasiado ruido debido a que las variaciones en la amplitud relativa son grandes, cuyo comportamiento no muestra un ciclo regular. De modo que en el espectro de la señal, Fig. 24 B), se muestran varios picos de diferentes intensidades, el más alto se encuentra a 240 Hz. Alrededor de este se observan picos de menor intensidad. La Fig. 24 C) muestra un acercamiento del pico a 240Hz.

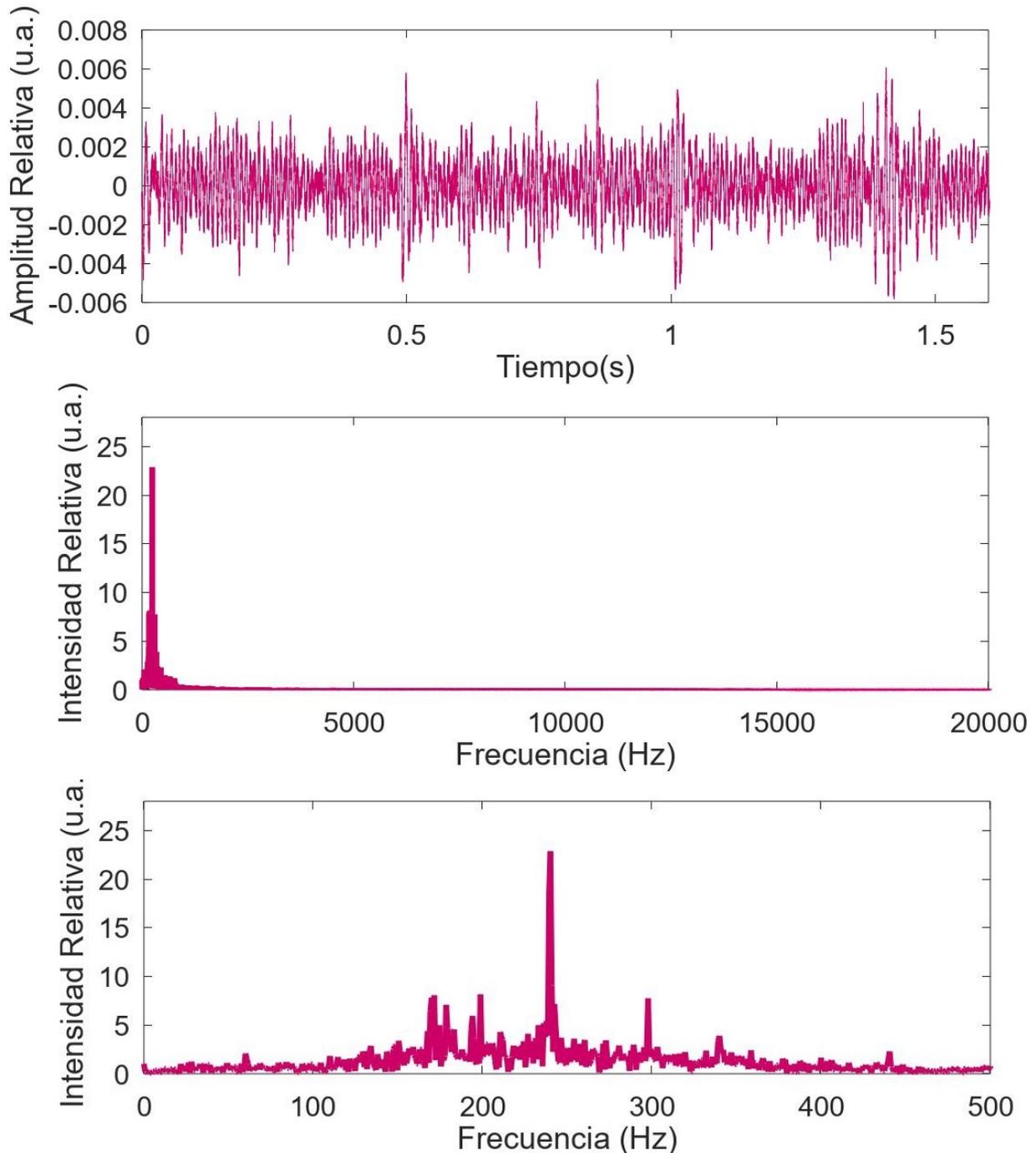


Figura 24. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma, **B)** Espectro y **C)** Zoom del espectro. Los gráficos corresponden a la capacidad de respuesta del sensor a una frecuencia de 20,000 Hz. Obtenido de las mediciones en la primera caja.

Finalmente, en la Fig. 25 A) se puede apreciar el oscilograma obtenido de la respuesta del micrófono a una frecuencia de 7,000 Hz. El resultado fue una banda rectangular que se comporta de forma casi uniforme a lo largo del tiempo y cuya amplitud relativa es de 0.004 u.a. No obstante, podemos observar pequeñas variaciones en la amplitud a los 0.7 y 1.2 s, probablemente debido a la manipulación de la caja.

La Fig. 25 B) muestra un pico de gran intensidad con una frecuencia de 7,000 Hz. Siendo el resultado que esperábamos. Sin embargo, se observan pequeños picos de baja intensidad en frecuencias de alrededor de los 250 Hz, esto explica las pequeñas variaciones en la amplitud observadas oscilograma.

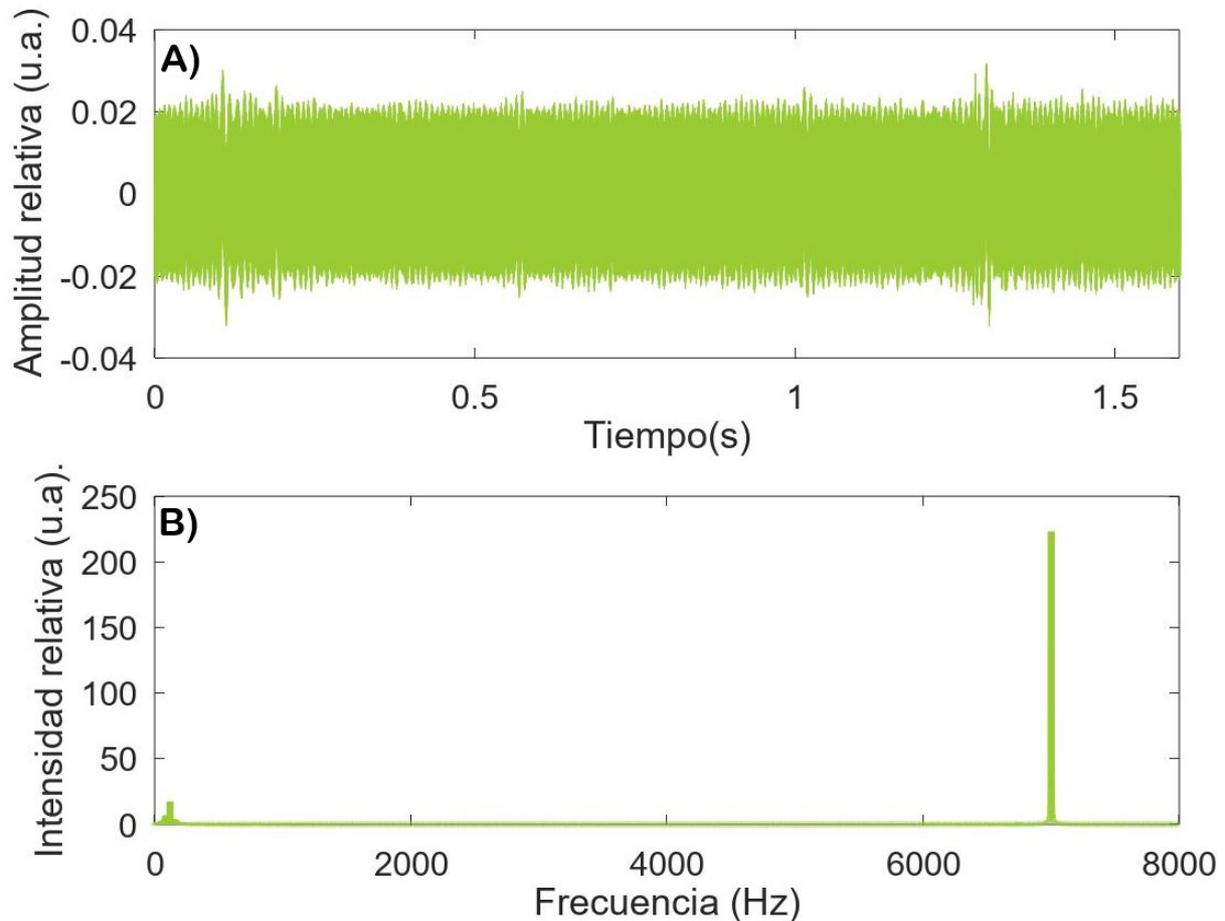


Figura 21. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma y **B)** Espectro. Los gráficos corresponden a la capacidad de respuesta del sensor a una frecuencia de 7,000 Hz. Obtenido de las medición en la primera caja.

Los oscilogramas cuyas frecuencias de registro son de 250 y 20,000 Hz (tono grave y agudo, respectivamente) presentaban variaciones de amplitud relativa poco constantes. Esto último, pudo suceder debido a que ruidos externos interfirieron en la señal, y que fueron más notorios en tonos graves y agudos. Esta idea es más clara en el espectro de frecuencias, la señal suministrada a la caja y al receptor, no corresponde con la frecuencia de excitación. No obstante, las frecuencias intermedias fueron bien registradas.

Probablemente las características de la caja, como son su baja masa y pobre aislamiento sonoro, son la fuente de las discrepancias observadas. Ante tales resultados, se decidió construir una segunda caja, mejorando el aislamiento acústico.

### 3.2.2 Resultados para la segunda caja

En la Fig. 26 A). Se aprecia el oscilograma generado de la señal acústica capturada por el sensor, esta tiene la forma de una banda de forma rectangular, con una amplitud constante. Por lo que la señal obtenida se muestra limpia, sin la interferencia de ruidos externos. En el espectro Fig. 26 B) se observa un pico de gran altura en la frecuencia de 250 Hz, siendo este el valor más alto, aunque se observan algunos otros picos de menor intensidad, probablemente a la manipulación externa de la caja. En la Fig. 26 C) se observa con mayor claridad la frecuencia de 250 Hz. En este caso, la frecuencia capturada por el dispositivo móvil, si corresponde a la frecuencia que se generó a través del programa.

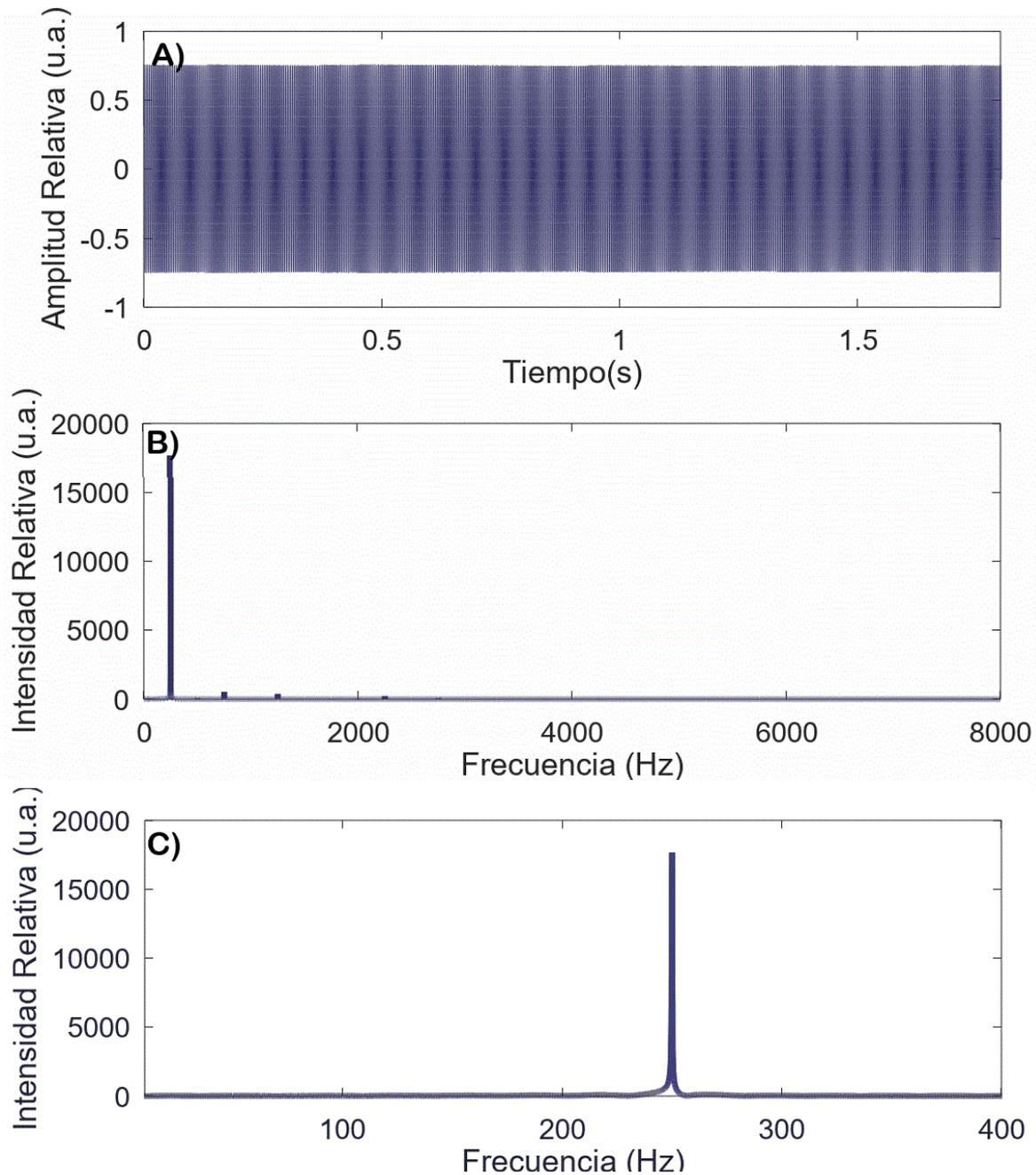


Figura 26. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma , **B)** Espectro de frecuencias y **C)** acercamiento del espectro, que corresponden a la capacidad de respuesta del sensor a una frecuencia de 250 Hz. Obtenido de la medición en la segunda caja.

En la Fig. 27. A) se observa el oscilograma obtenido de la señal capturada al excitar el sensor a una frecuencia de 2,000 Hz, de la misma manera que el caso en anterior, se logra observar una banda de forma rectangular, manteniendo un comportamiento uniforme y constante.

En el espectro de frecuencias Fig. 27. B) se observa un pico de gran intensidad a una frecuencia de 2,000 Hz, lo que indica que el celular registró correctamente la señal generada a través del programa. Sin embargo, se observa un pico de menor intensidad a 6,000 Hz. Probablemente debido a manipular la caja.

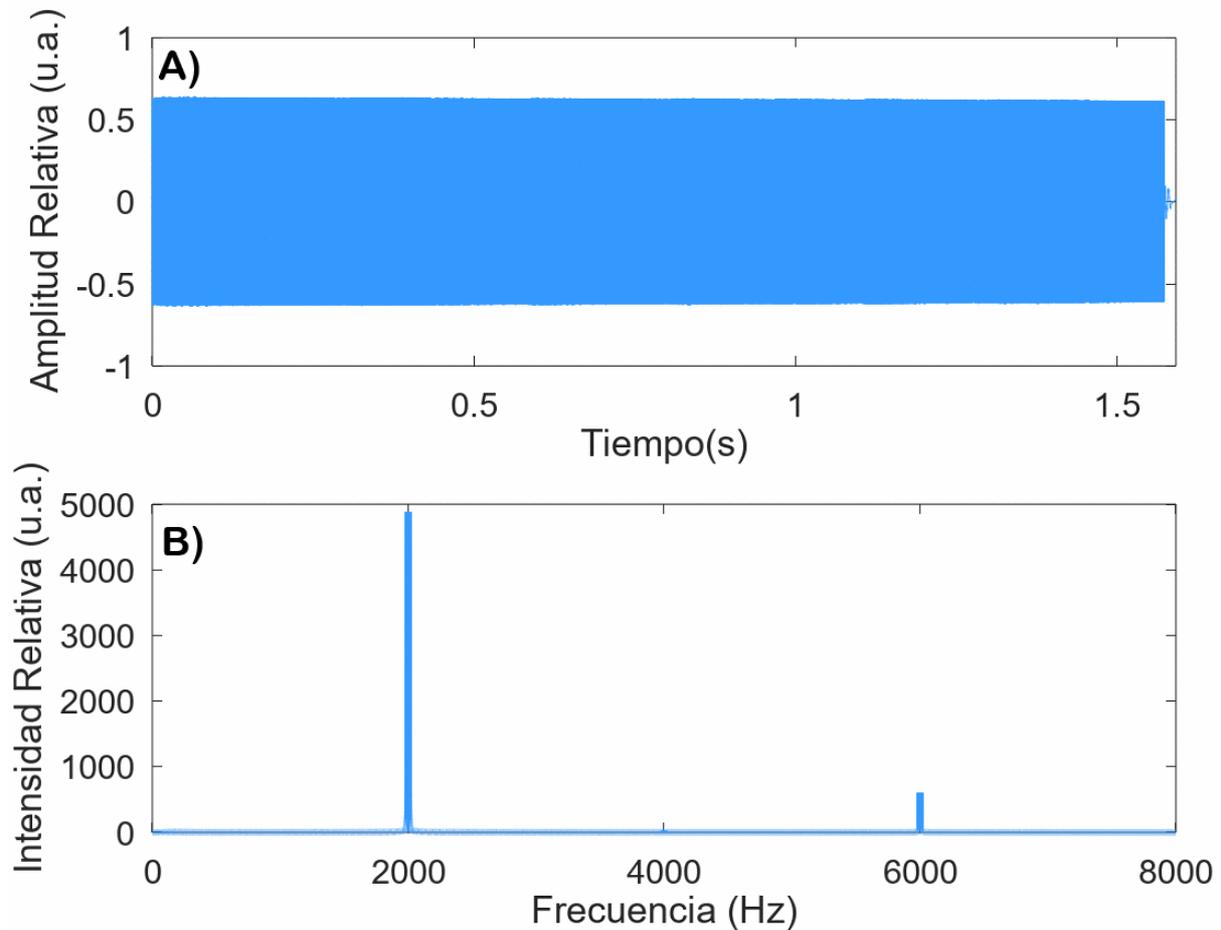


Figura 27. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma y **B)** Espectro de frecuencias, corresponde a la capacidad de respuesta del sensor a una frecuencia de 2,000 Hz. Obtenido de la medición en la segunda caja.

La Fig. 28 A) muestra el oscilograma obtenido al excitar el sistema a 20,000 Hz de frecuencia. El resultado, una señal bastante distorsionada con demasiado ruido debido a que se observan grandes variaciones de la amplitud relativa, y cuyo comportamiento no muestra un ciclo regular. De modo que el espectro de frecuencia de la señal, Fig. 28 B), se muestran varios picos de diferentes intensidades, siendo que el más alto se encuentra a una frecuencia de 144 Hz. Alrededor de este se observan picos de menor intensidad. La Fig. 28 C) muestra un zoom del pico a 144 Hz de frecuencia.

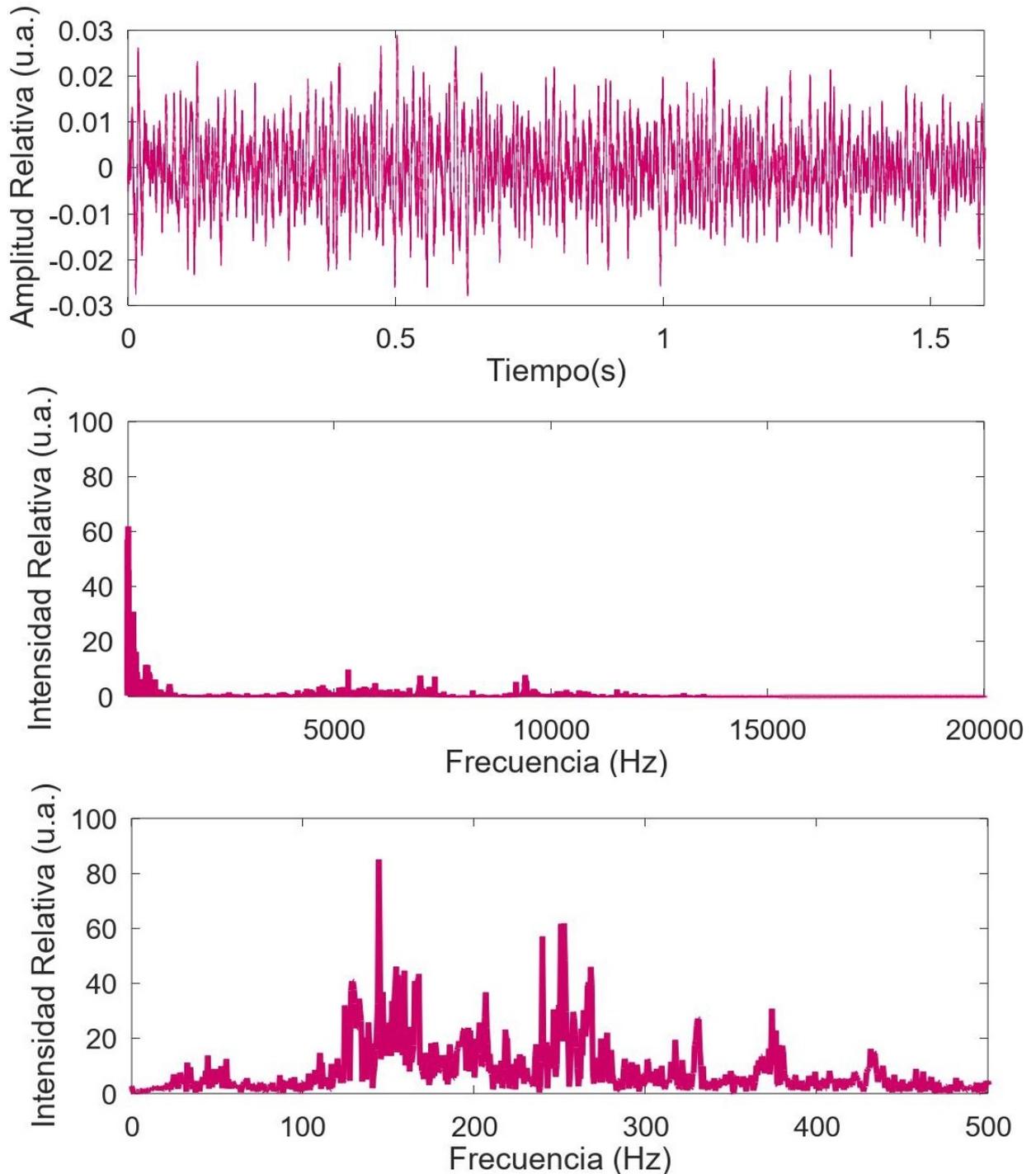


Figura 28. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma y **B)** Espectro de frecuencias, **C)**acercamiento del espectro de frecuencias. Corresponden a la capacidad de respuesta del sensor a una frecuencia de 20,000 Hz. Obtenido de la medición en la segunda caja.

Finalmente, la Fig. 29 A) el oscilograma cuya frecuencia es 7,000 Hz, se puede visualizar una banda que se comporta de forma casi uniforme, con una amplitud constante y uniforme. No observándose picos de gran amplitud que sobrepasen dicho valor.

La Fig. 29 B) el espectro de frecuencias muestra un pico de intensidad alta a 7,000 Hz., siendo este el valor de frecuencia esperado. Además, se observa un pequeño pico de baja a 200 Hz, probablemente debido a la manipulación externa de la caja.

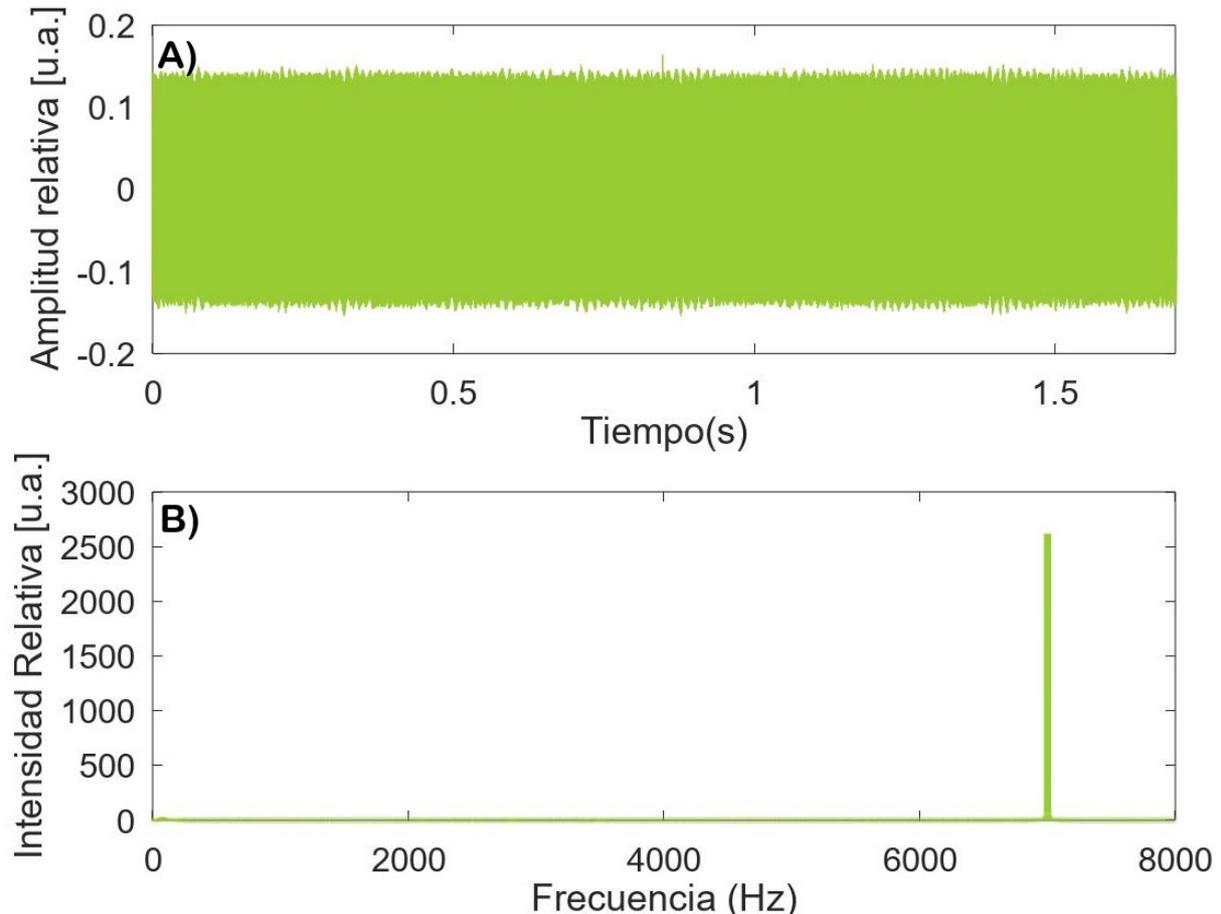


Figura 29. Se visualizan los siguientes elementos: **A)** Oscilograma y **B)** Espectro de frecuencias. Los gráficos corresponden a la respuesta del sensor a una frecuencia de 7,000 Hz. Obtenido de la medición en la segunda caja.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la primera y segunda caja, la capacidad de respuesta del sensor no es buena cuando se genera una frecuencia a 20 kHz (tono agudo). Sin embargo, al observarse el registro de la señal a una frecuencia de 7 kHz (tono agudo), los resultados obtenidos son muy buenos, ya que podemos visualizar en ambos espectros de frecuencias un pico de gran intensidad a 7 kHz. Por lo tanto, consideramos que los resultados obtenidos se deben a la calidad del sensor.

Los resultados son buenos dado que, en tonos graves (250 Hz.), hubo una mejoría en la calidad del registro, debido a la ausencia de oscilaciones que cambian bruscamente de amplitud relativa, al mantenerse estos valores de forma constante. Además, en el espectro de frecuencias se observa una mejoría en la calidad, al observarse solo un pico de gran intensidad en la frecuencia correspondiente a 250 Hz., valor que esperábamos obtener.

Por tanto, siendo que la segunda caja se obtuvo mejores resultados, es necesario mejorar los materiales. Por ejemplo, uno de los factores que pudieron haber afectado en el resultado del registro de tonos agudos fue el material empleado en interior de la caja, es decir, la espuma, por lo que consideramos necesario aumentar el espesor de este.

Respecto a la cámara de aire que se dejó entre ambas cajas y que fue rellena con lana mineral, la interferencia de ruido externo no afectó en la recepción de audio, obteniéndose gráficos limpios, cuyos intervalos de amplitud se mantuvieron constantes. Además, el espectro de frecuencia registró una menor cantidad de picos de baja intensidad respecto a la primera caja.

En esta práctica, empleamos dos tipos de dispositivos: el micrófono del teléfono móvil y un altavoz o bocina. Ambos equipos se les conoce como transductores electroacústicos. El altavoz realiza una conversión de la señales eléctricas programadas a través del computador en vibraciones sonoras. El micrófono del celular realiza una conversión de vibraciones acústicas a señales eléctricas.

El altavoz es un elemento que pudo afectar los resultados obtenidos. Si bien, lo ideal sería que el altavoz transducirá exactamente las frecuencias generadas a través del software, las bocinas varían en el intervalo de frecuencias que pueden emitir dependiendo de las características del mismo. Por ejemplo, el audifono de diadema tiene un intervalos de frecuencia de 20- 10,000 Hz., por lo tanto, cuando generamos la señal a 20 kHz., el pico del espectro de frecuencias no fue el esperado, obteniéndose uno de menor frecuencia. En cuanto, al altavoz de la segunda caja, tampoco obtuvimos el resultado esperado, a pesar de que el máximo de frecuencia a emitir es de 20 kHz. Por lo tanto, cuando generamos una frecuencia a través del programa, no se garantiza que realmente sea el valor que emitirá el altavoz o bocina.

El sensor del micrófono del dispositivo móvil es otro elemento que, como ya hemos mencionado, en el mercado existen diferentes marcas y modelos; por ende, la calidad del sensor puede variar. Además, este tipo de dispositivos está diseñado para que los sonidos que pueda grabar o registrar sean los que se encuentren dentro de espectro audible humano. Considerando que una persona sin ninguna dificultad auditiva puede escuchar un sonido a una frecuencia máxima de 20 kHz, al fabricante de celulares no le conviene diseñar un micrófono que pueda capturar señales de 20 kHz o a una mayor frecuencia porque el ser humano ni siquiera podría escucharlos. Este es el elemento principal que pudo haber influido en los resultados.

En cuanto a los resultados observados en las mediciones a 250 Hz observamos lo siguiente: en la primera caja se presentó un pico a 120 Hz, mientras que, en la segunda caja, el pico observado fue de 250 Hz. Al principio, creímos que el pico de 120 Hz se trataba del registro de las líneas de potencia eléctrica, sin embargo, esto no se presentó en la segunda caja. Por lo tanto, este efecto se debió posiblemente a las características del sistema. El primer dispositivo se trata de una caja de cartón y por ende, este material absorbe frecuencias bajas. Mientras que, nuestro segundo sistema está construido a base de cajas de madera, así que no hubo absorción.

## 3.3 Calibración mediante impulsos sonoros

### 3.3.1 Mediciones en la segunda caja

Considerando que los resultados fueron aceptables en la segunda caja, procedimos a realizar una segunda caracterización del teléfono celular. Esta vez analizando la intensidad relativa sonora; generamos 15 señales variando la intensidad de la fuente (manteniendo constante la frecuencia). Las señales fueron generadas a través del software “*Two Channels Frequency Generator* v.1.2. para visualizar los niveles de intensidad de entrada ir al apéndice D, tabla D.1. El teléfono móvil, un equipo de la marca Motorola modelo C plus, se colocó en posición vertical apoyado sobre la base del piso de la caja y con la pantalla dirigida en dirección a la fuente de sonido, de tal manera que el micrófono se encuentra dirigido hacia la base.

En la Fig. 30 se presenta una captura de pantalla de programa *Audacity*, donde se muestran las señales registradas, 15 variaciones de intensidad –min = 6.02 dB, max = 42.00 dB, con incremento variable– y a tres frecuencias diferentes: A) 250 Hz, B) 2,000 Hz, y C) 20,000 Hz. En la imagen, cada nivel de intensidad se puede identificar por su morfología de rectángulo, pero a una frecuencia de 20,000 Hz son indistinguibles los rectángulos, pues el ancho de banda del micrófono no permite ir más allá de este umbral.

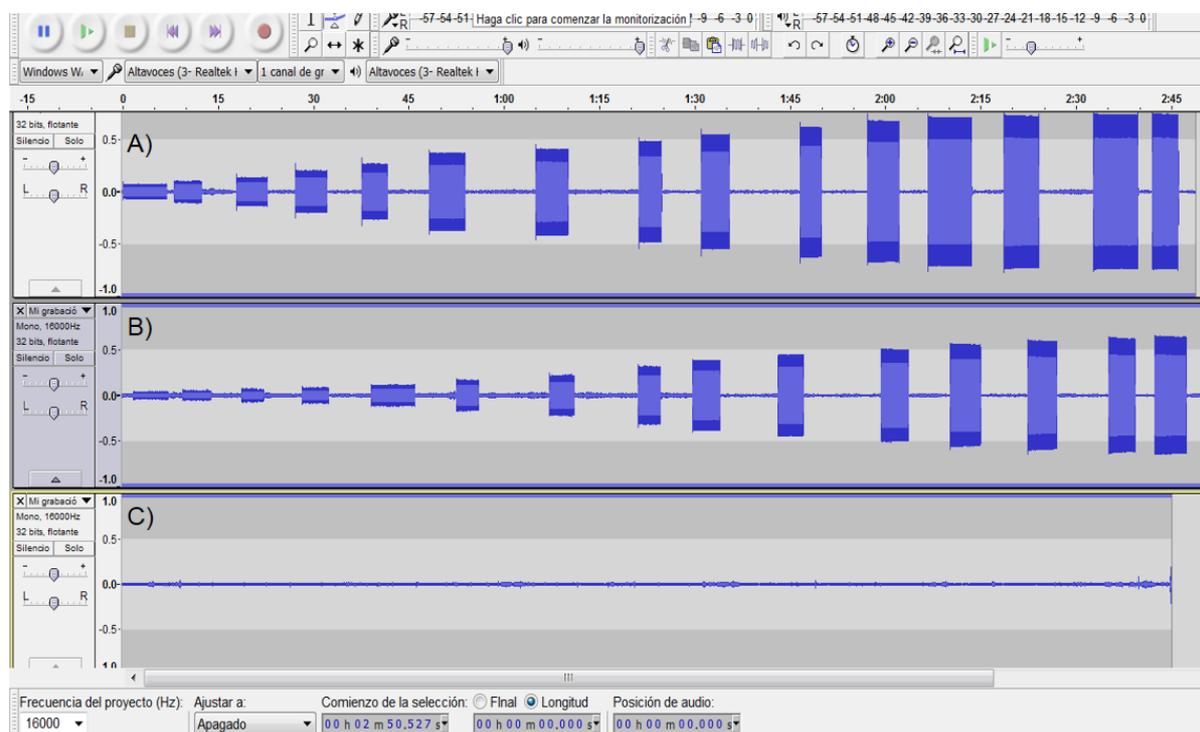


Figura 30. Se visualizan los siguientes oscilogramas: **A)** Tono grave, **B)** Tono medio y **C)** Tono agudo. a través del programa *Audacity*.

Para cada señal capturada, calculamos los niveles máximos de intensidad, siendo 100 los elementos que se eligieron y posteriormente se promediaron. El resultado de este cálculo permitió cuantificar una parte representativa de la intensidad capturada por el dispositivo. Para determinar la calidad cuantitativa de los datos obtenidos y de la confiabilidad de estos, se procedió a realizar el cálculo de incertidumbre a través de la desviación estándar.

En la Fig. 31 se observa una serie de puntos (en color azul, fucsia y morado) que representan las intensidades relativas (eje ordenadas) en función de la intensidad de entrada (eje de las abscisas), a frecuencias constantes de 250 Hz, 2 y 20 KHz, respectivamente. Los niveles de intensidad se encuentran asociados con un nivel mínimo y máximo de incertidumbre, estas las podemos visualizar a través de los triángulos en (color amarillo, verde y gris, respectivamente).

Los puntos que representan las intensidades relativas y cuyas frecuencias de entrada fueron 250 y 2000 Hz, conservan un comportamiento de orden ascendente, siguiendo la tendencia de una función monótona creciente. Los puntos siguen una función no lineal, es decir, conforme se incrementa la intensidad de entrada, se espera que haga lo mismo la intensidad relativa. En cuanto a los niveles de incertidumbre, estos se muestran bajo, puesto que, los triángulos se encuentran superpuestos entre sí, e incluso superpuestos con los puntos que representan los niveles de intensidad relativa. Para el caso de la incertidumbre a 250 Hz, en el punto 8, cuyo valor de intensidad de entrada es de 27.60 dB, se observa que existe una separación entre la incertidumbre mínima y máxima. El valor de la incertidumbre asociada es de 0.042383 u.a., sin embargo, resulta ser muy baja debido a que no sobrepasa la unidad. En cuanto a la señal de 2 kHz, podemos observar que el nivel de incertidumbre es bajo, los triángulos se encuentran superpuestos, siguiendo el mismo comportamiento de los puntos que representan la intensidad relativa.

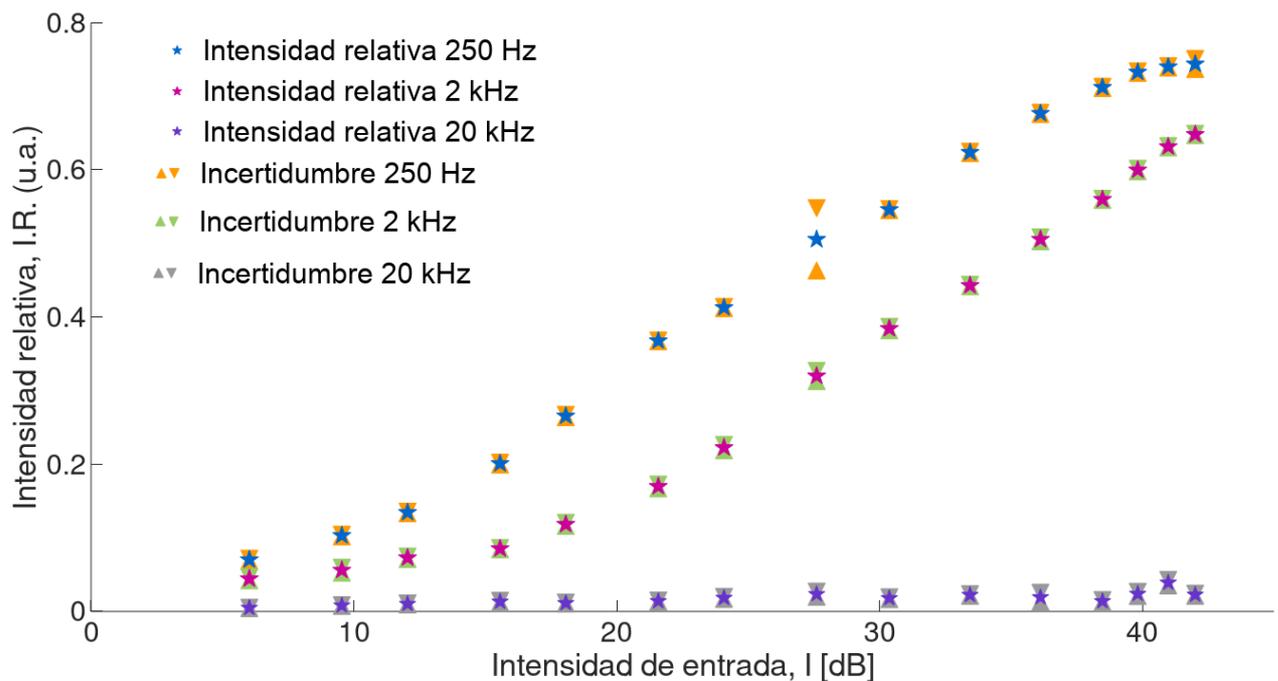


Figura 31. Gráfica que representa el incremento en la intensidad para una frecuencia constante de 250 Hz, 2 , 7 y 20 KHZ.

La intensidad relativa mínima es de 0.070 u.a. y la máxima es de 0.74 u.a., en el que la señal es de una frecuencia de 250 Hz. La intensidad mínima relativa es de 0.04 y la máxima es de 0.64, para la señal cuya frecuencia es de 2 KHz.

Finalmente, en las intensidades a una frecuencia de 20 KHz, se aprecia una gran dispersión de los puntos que representan la intensidad relativa, al no presentar una tendencia. La intensidad relativa mínima registrada fue de 0.0047 u.a. y la máxima fue de 0.039 u.a.. También se puede observar que los valores de intensidad se encuentran por debajo de los valores obtenidos para las frecuencias 250 y 2,000 Hz., en lo que respecta a la incertidumbre de los datos obtenidos se muestra relativamente baja.

Al hacer una comparación de las tres gráficas obtenidas, podemos decir que, la calidad de información registrada fue mejor a frecuencias de 250 y 2,000 Hz, puesto que, los puntos siguen un orden ascendente, tal y como se esperaba, conforme se incrementa la intensidad sonora, el resultado se verá reflejado en la intensidad que registrara el dispositivo.

Se encontró que, el nivel máximo de intensidad relativa registrada fue mayor a una frecuencia de 250 Hz, por tanto, se recomienda que las caracterizaciones en dispositivos móviles se lleve a cabo a una frecuencia de 250 Hz. No es conveniente realizar una caracterización de intensidad a 20 kHz, debido a que los niveles de intensidad relativa no siguen una tendencia, mostrándose puntos dispersos, probablemente debido a la baja sensibilidad del sensor, impidiendo el registro de señales de alta frecuencia. Además, a esta frecuencia se obtuvieron los niveles de intensidad relativa más bajos, no sobrepasando el valor de 0.1 u.a.

### 3.3.2 Calibración mediante impulsos sonoros en cámara anecoica

Con la finalidad de contrastar los resultados obtenidos en las cajas construidas, se realizaron mediciones en la cámara anecoica del Laboratorio de Acústica y Vibraciones ICAT- UNAM. La cámara anecoica se caracteriza por ser un cuarto de doble pared de concreto sólido –cada una de 30 cm de espesor– con un espacio de separación entre estas que funciona aislante contra vibraciones. En su interior, las paredes, el techo y el piso están cubiertas de cuñas de hule espuma, permitiéndole aislamiento de vibraciones externas y ser altamente absorbente de sonidos en su interior [65,66].

Las mediciones las llevamos a cabo empleando los mismo dispositivos que en el caso de las cajas. Empleamos un teléfono celular de la marca motorola, modelo C plus, como receptor del sonido. La fuente de sonido fueron las bocinas la marca Logitech. Para efectos de la medición, utilizamos el altavoz izquierdo.

El dispositivo móvil fue colocado horizontalmente, con la pantalla dirigida hacia el techo, y con el sensor en dirección hacia la fuente de sonido. La distancia de separación entre la fuente sonora y el receptor fue de 65 cm. Se generaron 15 señales de sonido con

niveles de intensidad variable en un intervalo de 6.02 y 42.00 dB en el software “*Two channels Generator*”, para visualizar las intensidades de entrada ir al apartado D, tabla D.2.

En la Fig. 32, se puede apreciar las características de la cámara anecoica en su interior, así como la disposición de los equipos empleados para la medición. Los bloques rectangulares sobre los cuales se colocaron los dispositivos (computadora, bocina y celular) son de hule espuma. Se evitó ingresar otro tipo de objetos, con la finalidad de no afectar en las mediciones.

En la Fig. 33, se puede observar la captura de pantalla del programa “*Audacity*” con las 15 señales generadas a diferentes niveles de intensidad, para cada una de las frecuencias: 250, 2000, 7000 y 20000 Hz. Se aprecia de forma clara cada uno de la señales a través de rectángulos de diferentes alturas, excepto a una frecuencia de 20 kHz, en donde solo se puede apreciar una línea horizontal.



Figura 32. Fotografía durante la actividad de caracterización del micrófono del teléfono celular, en la cámara anecoica del Instituto de Ciencias Aplicada y Tecnología ICAT-UNAM.

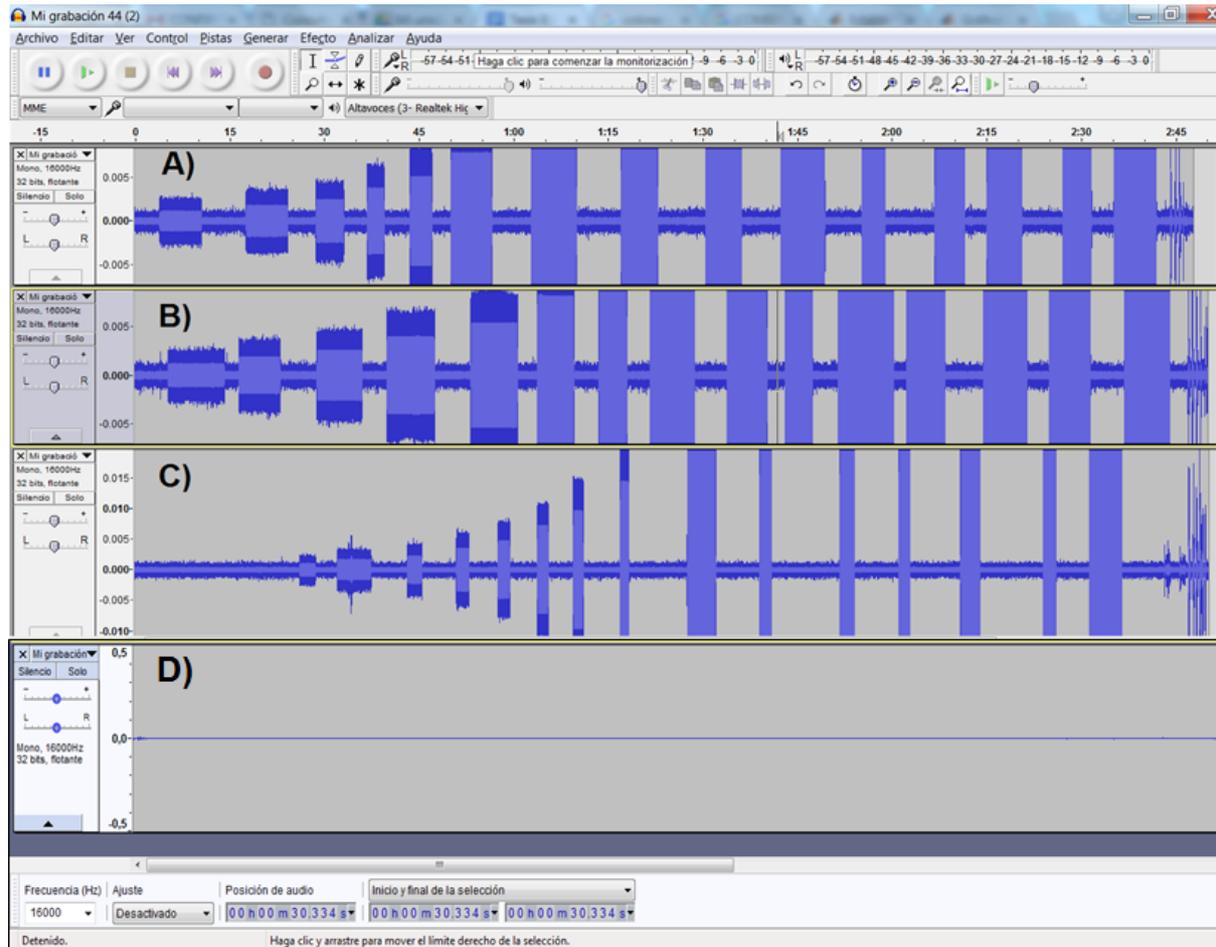


Figura 33. Captura de pantalla de los 15 señales registradas por el sensor en la Cámara Anecoica a una frecuencia constante: **A)** 250 Hz, **B)** 2 kHz y **C)** 7kHz, **D)** 20 kHz. Analizadas través del programa *Audacity*.

En las Fig. 34, se muestran las gráficas con los 15 puntos (color azul, rosa y morado) que representan las intensidades relativas en función de la intensidad de entrada a una frecuencia constante de 250, 2,000 , 7,000 y 20,000Hz, respectivamente. Dichos puntos siguen la tendencia de una curva con un crecimiento ascendente, incrementando el nivel de intensidad capturada por el dispositivo conforme se aumenta la intensidad de entrada, excepto a una frecuencia de 20, 000 kHz.

Cada uno de los niveles de intensidad se encuentra asociados a un nivel minimo y maximo de incertidumbre, esto los podemos ver representados a través de los puntos en color (en color naranja, verde y gris), para cada una de las frecuencias respectivas, estos se se superponen entre sí, e incluso entre los niveles de intensidad relativa, por lo que el error en las mediciones es muy baja o nula.

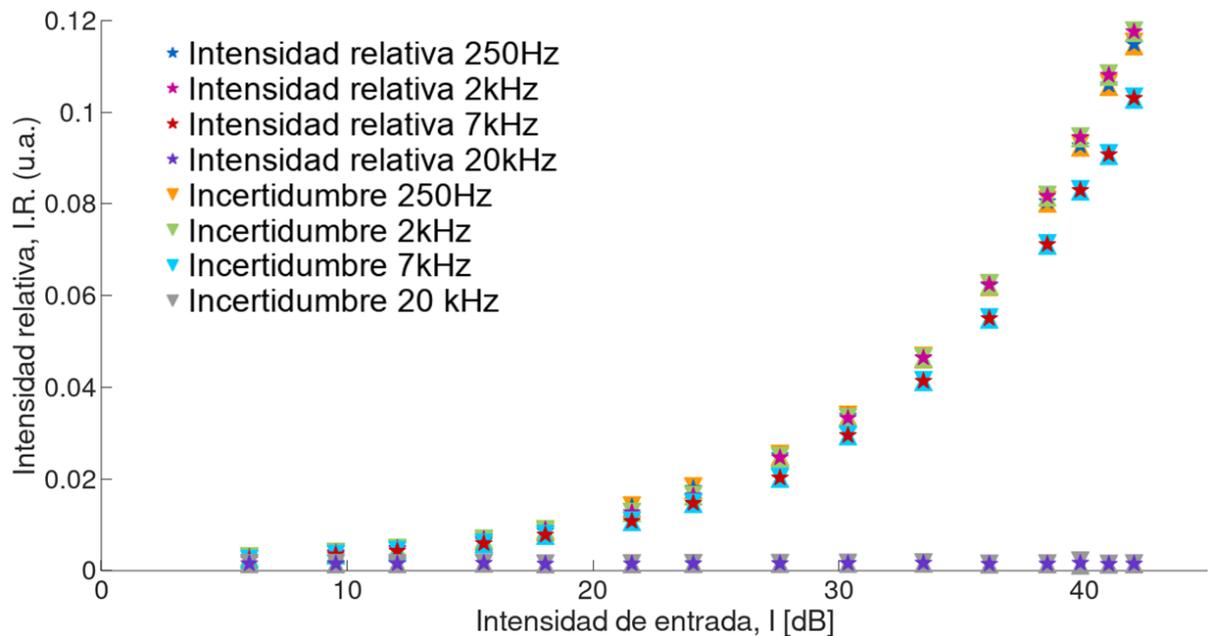


Figura 34. Niveles de intensidad de entrada registrados en interior de cámara anecoica a frecuencias de 250, 2,000, 7,000 y 20,000Hz.

### 3.3.3 Conclusiones parciales

Al realizar la comparación de los resultados obtenidos en la segunda, podemos concluir que los niveles de intensidad relativa siguen un mismo comportamiento a los mostrados por las mediciones obtenidas de la cámara anecoica. Sin embargo, si realizamos la comparación respecto al nivel de intensidad capturado por el dispositivo móvil, observamos que el nivel máximo de intensidad es de 0.12 u.a. en la cámara anecoica; mientras que, en la segunda caja el valor es de 0.8 u.a., esto probablemente se debe a la distancia entre la fuente de sonido y el receptor.

En lo que respecta a los porcentajes de incertidumbre relativa, observamos que el nivel de incertidumbre de los resultados de la cámara anecoica son menores en relación a los resultados de la segunda caja, en la tabla 2. se visualizan los valores de porcentaje obtenidos. El porcentaje máximo de incertidumbre relativa a una frecuencia de 250 Hz, en la segunda caja es de 8.38%; mientras que en la cámara anecoica el porcentaje es de 0.40%.

A una frecuencia de 2 kHz, la segunda caja presenta un porcentaje máximo de incertidumbre relativa de 2.72%, en comparación la cámara anecoica de 0.32%. Finalmente, a una frecuencia de 20 kHz los valores de porcentaje máximo de incertidumbre relativo obtenidos son semejantes, sin embargo, la cámara presenta un porcentaje aún menor en comparación con la caja, con un valor de 31.49% en comparación de 32.51% de incertidumbre relativa máxima obtenida de la caja.

Porcentajes de incertidumbre relativa máxima (%)			
	250 Hz	2 kHz	20 kHz
Segunda Caja	8.38	21.72	32.51
Cámara anecoica	0.40	0.32	31.49

Tabla 2. Comparación de las incertidumbres máximas relativas en segunda caja y cámara anecoica.

Los resultados del porcentaje de incertidumbre máxima en la segunda caja se incrementan conforme se aumenta la frecuencia. En cambio, en la cámara anecoica, podemos observar que el porcentaje de incertidumbre es menor a una frecuencia de 2 KHz.

Sin embargo, no descartamos la idea de un nuevo dispositivo que permita realizar calibraciones de teléfonos celulares de mayor calidad, por ello proponemos el diseño de una caja mejorada, ver apéndice H.

### 3.4 TDOA (Diferencia de Tiempo de Arribo) en lugar abierto

El día 2 de julio del 2019, acudimos a las instalaciones de la Unidad Canina DGAPSU con dirección: Reserva Ecológica del Pedregal de San Ángel (REPSA) Núcleo Sur Oriente, Circuito Maestro Mario de la Cueva, Pedregal del Maurel, 04720 Coyoacan, CMX, México, lugar autorizado por la Dirección de Protección Civil (ver apéndice I), para llevar a cabo el desarrollo experimental que más adelante se mencionara.

#### 3.4.1 Descripción del lugar

Se trata de un lugar abierto de forma rectangular delimitado por: el muro norte con una altura de 1.20 m y el muro oriente de 1.90 m de altura respecto del suelo. En lado poniente se ubican los vestidores y las canchas del Deportivo Harp Helú, y al sur se ubican dos árboles y algunas casetas de perro. Las dimensiones del terreno son las siguientes: 74.74 m de largo por 61.76 m de ancho. El suelo se encuentra cubierto por pasto y montículos de hierba seca. En la Fig. 35. podemos observar las características del lugar.

Se debe señalar que, al tratarse de un espacio abierto no existen obstáculos entre la fuente de sonido y el sensor.



Figura 35. Fotografía del lugar en donde se realizó la medición.

### 3.4.2 Procedimiento

En el terreno, se colocaron siete conos señaladores de control de tránsito, cada uno de estos enumerados del 1 al 7, tal y como se representa en la Fig. 36. Posteriormente, se asignó a cada individuo un número y se pidió que se colocaran en la posición establecida.

Para tener una mayor precisión sobre la posición de los dispositivos, se solicitó a cada uno de los individuos registrar su ubicación a través de la aplicación de *Google Maps*, y se verificó con API HTML5. Cabe mencionar que este tipo de aplicaciones tiene un margen de error que depende de la conexión GPS, la cobertura de la señal del dispositivo, el lugar en donde se esté efectuando la ubicación (en espacios cerrados, los resultados son inexactos), la diferencia de los tiempos reales entre el reloj atómico del satélite y el reloj interno del dispositivo, las condiciones atmosféricas, entre otros factores. El promedio de margen de error lineal del GPS es de  $\pm 4.9\text{m}$ .

Las coordenadas geográficas de cada uno de los dispositivos móviles se pueden visualizar en el apéndice J: tabla J1.

Para lograr una sincronización en todas las grabaciones se solicitó a los individuos, estando todos reunidos en un solo punto, encendieran el grabador de sus dispositivos de tal manera que se registraron dos palmadas (aplausos). Finalmente, los individuos se colocarían en sus respectivas posiciones asignadas, sin pausar la grabación.

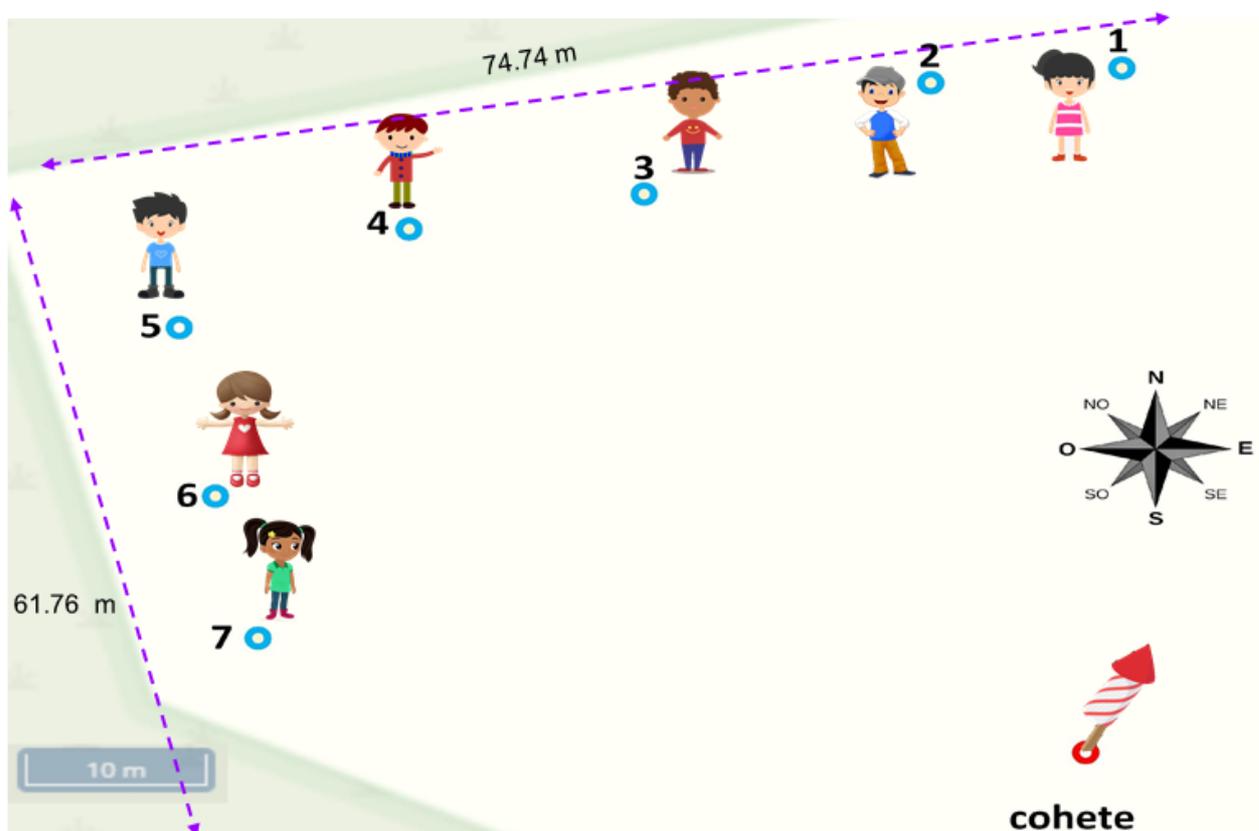


Figura 36. Colocación de los dispositivos móviles y el cohete. Obtenido de la plataforma MyGeodataCloud.

Estando todos los individuos en las posiciones asignadas, se procedió a encender la mecha del cohete, con las medidas de protección y seguridad adecuadas.

El cohete de fiesta consiste en cilindro de papel de aproximadamente 15 cm de altura y 3 cm de diámetro, y cuyo interior contiene pólvora. Este se encuentra adherido a un palo de madera de 85 cm de altura con una mecha. Cuando se enciende la mecha, la combustión de la pólvora genera el ascenso del cohete. Finalmente su explosión a cierta altura.

El cohete se colocó en posición vertical sujetado por las argollas de un soporte de madera que nosotros construimos. El cilindro se ubica en la parte superior, mientras que el resto del cuerpo se encuentra en la parte inferior. En la Fig.37. se observa una fotografía de la colocación de la fuente sonora.

Se realizó un control del registro de la temperatura con los datos aportados por el Observatorio Atmosférico de la UNAM OA-UNAM [67]. La ventaja que presenta la información proporcionada por OA-UNAM, es que lleva un registro por minuto de la temperatura. En el apéndice J, tabla J2, se puede observar una tabla con el registro de las temperaturas para cada una de las detonaciones.



Figura 37. Fotografía de la colocación del cohete en el soporte de madera.

### 3.4.1 Resultados

A continuación, se presentan los resultados del análisis de los siete sensores expuestos a una detonación.

En el cálculo se midió el tiempo en que la onda sónica alcanzó al sensor, tal onda se generó al momento en que la mecha incandescente termina y hace contacto con el resto del explosivo. Aquí, este proceso le llamamos combustión.

Si bien el explosivo se eleva y se aleja de los sensores, al momento no contamos con una referencia confiable de esas dos dimensiones. En futuros trabajos, se deberán presentar los respectivos análisis del momento en que el cohete explota en el aire.

#### ¿Cuántas señales se pueden analizar?

Para determinar el número resultados por cada una de las grabaciones de audio se procedió a realizar el cálculo a través de la siguiente fórmula:

$$s = \frac{n(n-1)}{2} \quad (3.1)$$

en donde  $n$  es el número de sensores o dispositivos móviles, y  $s$  es el número de direcciones posibles que se pueden obtener.

Por ejemplo, si se cuenta con 3 dispositivos móviles, obtendremos como máximo 3 direcciones posibles. Primero, obtendremos la distancia y la diferencia de tiempos de arribo entre el sensor 1 respecto a los sensores 2 y 3, hasta entonces tendremos 2 posibles direcciones. Posteriormente, se hará lo mismo con respecto al sensor 2, pero como ya se obtuvo la información con relación al sensor 1, entonces se omite y solo se hará en relación al sensor 3, obteniéndose sólo una posible dirección. Finalmente, con el sensor 3 ya no será necesario obtener información, ya que los datos se repetirían. Por lo tanto, obtendremos un total de 3 resultados que nos permitan determinar la ubicación de la fuente. En el esquema de la Fig. 38, podemos visualizar los resultados posibles en caso de contar con 3, 4 y 5 sensores. Los números entre parentesis y marcados en negro, representan los datos que obtendremos de las posibles direcciones. Los números en escala de grises, representan la información que se repetiría y que por ende debemos omitir. Las flechas en color azul representan:  $n$  y a  $(n-1)$ , de la fórmula anterior.

En nuestro caso, nosotros contamos con siete sensores que llevaron a cabo el registro de las detonaciones. Por lo tanto, obtendremos un total de 21 resultados, tal y como

se observa en la Fig. 39. Las líneas en colores representan las posibles direcciones que nos indicarán la posición del cohete sin que exista una repetición de datos.

Como podemos observar a medida que se incrementa el número de dispositivos móviles involucrados, mayor será la información que podremos obtener.

### Distancia entre sensores

El GPS de cada uno de los dispositivos móviles nos permitió conocer la ubicación de cada uno de estos en el terreno. Las coordenadas de las posiciones GPS están expresadas en grados en un formato (latitud/longitud), por lo tanto sería difícil calcular la distancia entre sensores en metros.

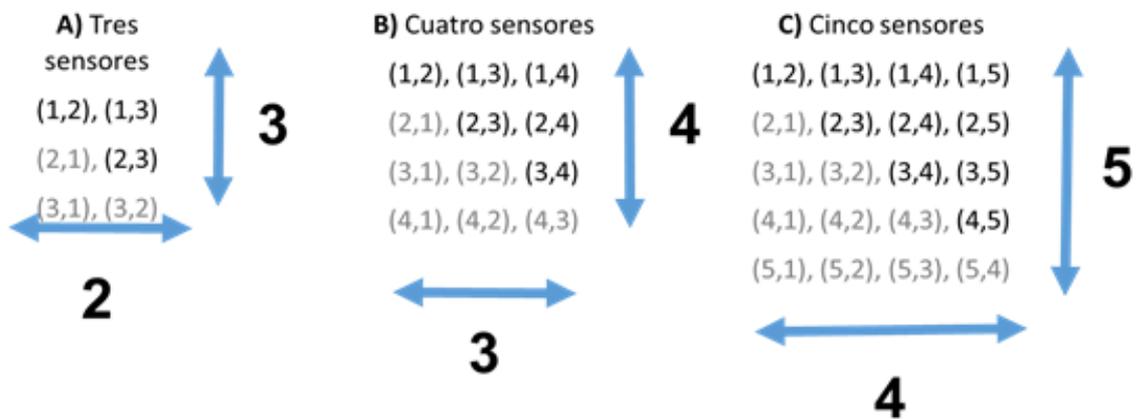


Figura 38. Esquema que representa resultados a obtener si contamos con 3, 4 y 5 sensores.

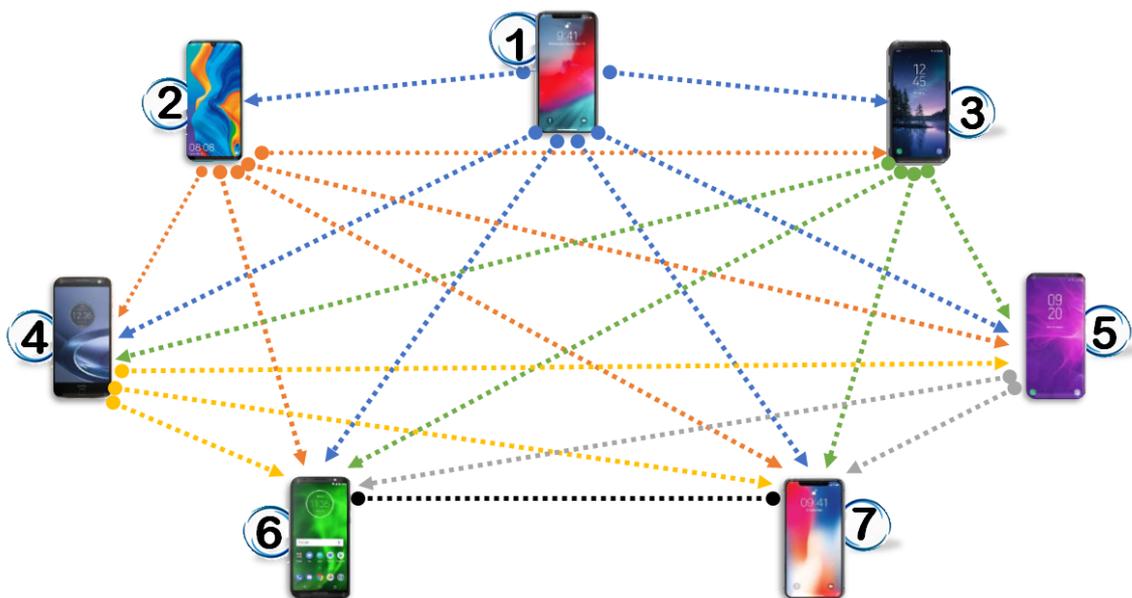


Figura 39. Esquema que representa los 7 dispositivos móviles y 10 líneas de colores que representan los resultados que podemos obtener.

Para obtener la distancia entre sensores, se procedió a realizar la conversión de coordenadas GPS a Coordenadas UTM (Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator). Se empleó el Sistema UTM porque establece magnitudes en metros, en un formato  $(x,y)$ . La posición para cada uno de los sensores en coordenadas GPS y UTM se encuentran en el apéndice J, tabla J1.

Posteriormente, se aplicó la fórmula que permite conocer la distancia entre dos puntos:

$$d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.2)$$

en donde:  $x_1$  y  $x_2$  representan la latitud de dos sensores,  $y_1$  y  $y_2$  representan la longitud de dos sensores, ambos en el sistema de coordenadas UTM. La distancia entre sensores se encuentra en el apéndice J: tabla J4.

### ¿Cómo se analiza por sincronización las señales?

En la Fig. 40 se visualiza la representación de dos audios extraídos de diferentes teléfonos celulares. Ambos audios registraron los sonidos: el aplauso, la combustión o ignición de la mecha y la explosión. Sin embargo, los audios no se encuentran alineados en el tiempo, por lo tanto, será difícil establecer los tiempos de arribo para cada una de las señales de interés. Todos los dispositivos móviles en nuestra experimentación registraron el sonido de un aplauso, pero en diferentes momentos, debido a que los individuos encendieron el grabador de su celular en diferentes tiempos. Por ejemplo, en la Fig. 36. observamos que el audio 2 corresponde al celular que activó primero la función de grabación de audio y posteriormente lo hizo el celular que corresponde al audio 1. Por lo tanto, observamos un desfase en ambas señales que no permitiría calcular correctamente los tiempos. No obstante, el sonido del aplauso lo podemos utilizar para alinear los audios y poder establecer los tiempos de arribo. Para lograr la sincronización es necesario recorrer el audio 2 hacia la izquierda, de tal manera que los sonidos del aplauso queden alineados entre sí.

La Fig. 41. muestra el esquema de dos grabaciones de audio. En las representaciones se ha simplificado la señal omitiendo ruidos y trazando los sonidos de impulso como picos. El primer pico (de izquierda a derecha), representa la señal del aplauso que sincroniza a los sensores. El segundo pico es el estruendo de la combustión y el tercer pico es la explosión del cohete en el aire. La señal en la parte superior es del sensor más cercano a la fuente de sonido. Mientras que, la señal de la parte inferior corresponde al sensor más alejado. Entonces, la diferencia de distancias de los sensores y fuente produce un desfase en ambas señales. Suponiendo que la velocidad del sonido en el aire es constante, podemos estimar la diferencia del retardo de la señal.

Para conocer la diferencia en los tiempos de arribo, se realizó lo siguiente: Se obtuvo el tiempo en que se presentó el aplauso, posteriormente el tiempo en que aparece el sonido del estruendo de la combustión. Finalmente, se obtuvo el sonido del aplauso y el de la combustión. Al conocer los tiempos de arribo para cada uno de los audios, se procedió a establecer la diferencias de tiempos entre audios, es decir, la diferencia de tiempos del audio

del sensor 1 con el resto de los demas audios, y así sucesivamente con el resto de los sensores.

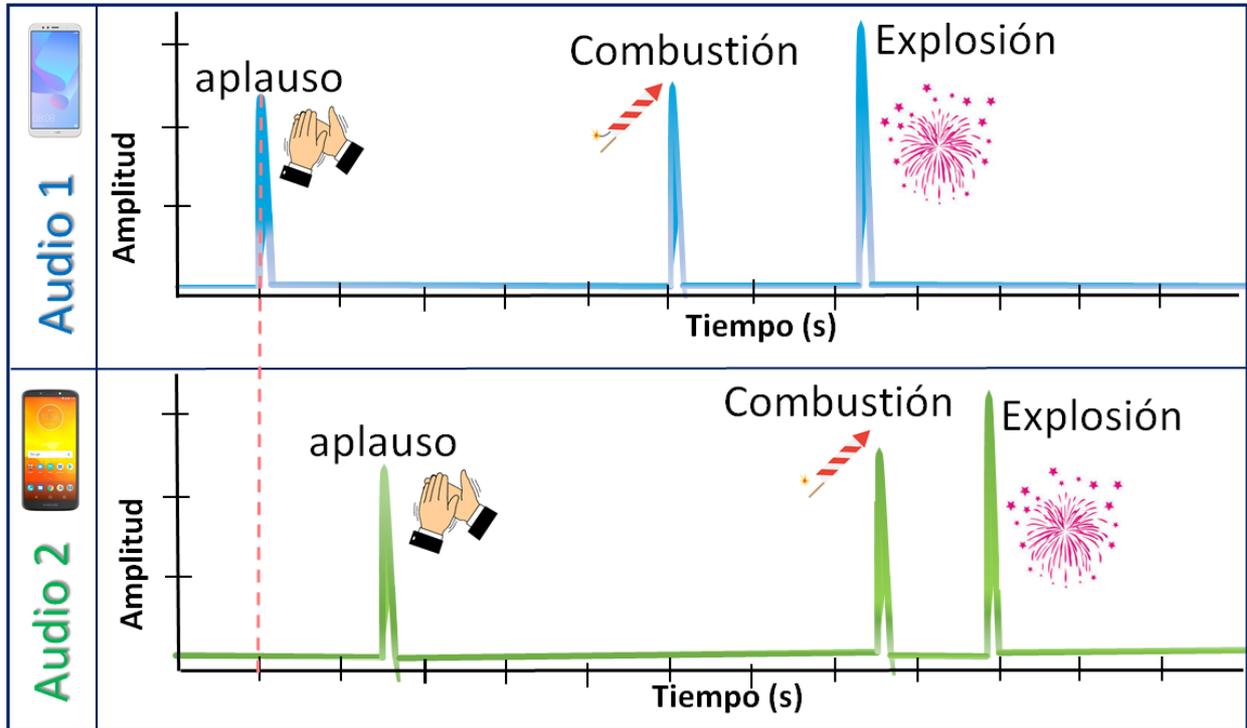


Figura 40. Esquema que representa dos audios de diferentes celulares no sincronizados.

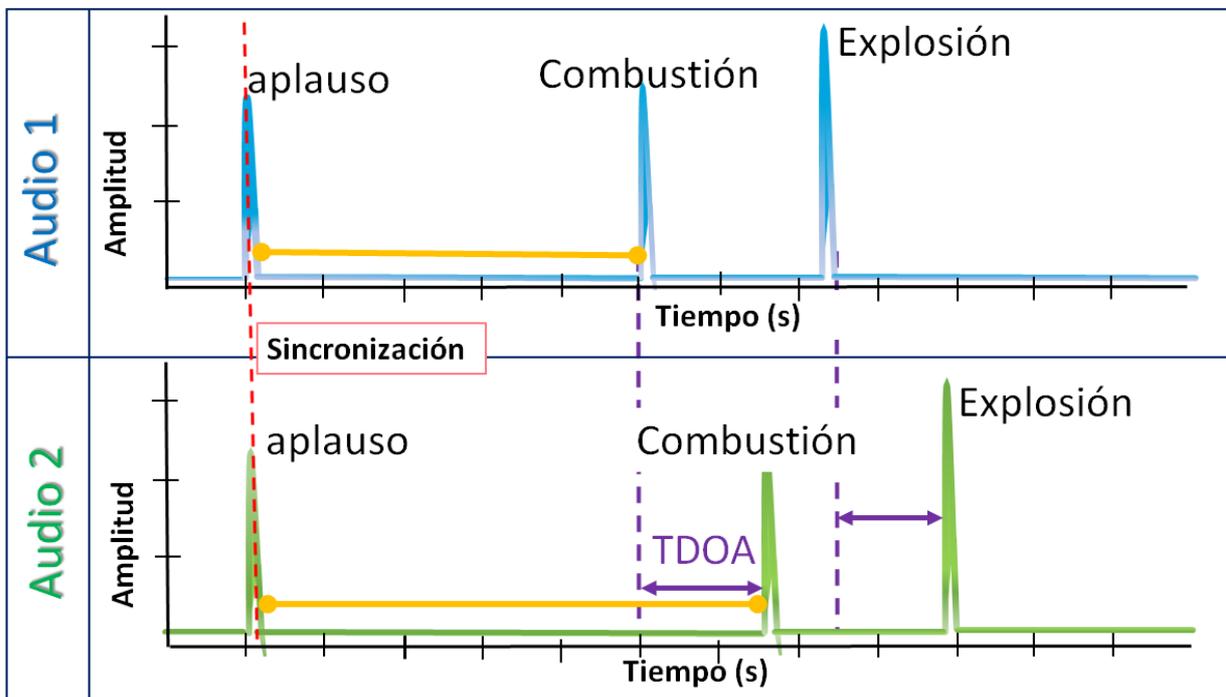


Figura 41. Alineación de dos grabaciones en el tiempo.

En este caso, la sincronización de las grabaciones fue sencilla debido a que contamos con un elemento común en los audios: el sonido de la palmada, y que utilizamos como referencia para alinear en el tiempo todas las grabaciones. Sin embargo, en un escenario forense difícilmente contaremos con un cronómetro común en los múltiples dispositivos. Al no existir una señal como referencia, entonces se debería tratar de buscar una señal común cuya ubicación en la escena deberá ser conocida. Por ejemplo, el sonido generado a través de los ecos podría ayudar a solucionar esta dificultad. Los diferentes sistemas de grabación no sincronizados, como son los dispositivos móviles, podrían dificultar la tarea de determinar el tiempo de arribo de la señal del disparo.

Se realizaron un total de 12 detonaciones, de las cuales seleccionamos la grabaciones de la detonación 4 debido a que los resultados en los tiempos de arribo se ajustan mejor a lo teóricamente esperado, es decir, los resultados sigan la tendencia a una línea recta.

En la gráfica de la Fig.42, se observa que los tiempos de arribo de la señal se van incrementando a medida que la distancia entre el sensor y el punto en donde se realizó la detonación del cohete aumenta, pero no siguen como tal una tendencia lineal ascendente.

Los sensores 2 y 4 mostraron un tiempo de arribo diferente al esperado. El sensor 2 (a 42.97 m de separación de la fuente de sonido) mostró un tiempo de arribo mayor respecto al sensor 1 (a 43.23 m), siendo que este último se encuentra más lejano a la fuente del sonido. En el caso del sensor 4(48.33 m) registró un menor tiempo de arribo con respecto el sensor 6 (48.10 m), siendo que este último se encuentra mucho más alejado de la fuente. Los tiempos de arribo obtenidos en los sensores 2 y 4 fueron diferentes a los esperados, probablemente debido a que la distancia con respecto a la fuente de sonido es similar a los sensores 1 y 6, respectivamente, con una diferencia menor a 30 cm.

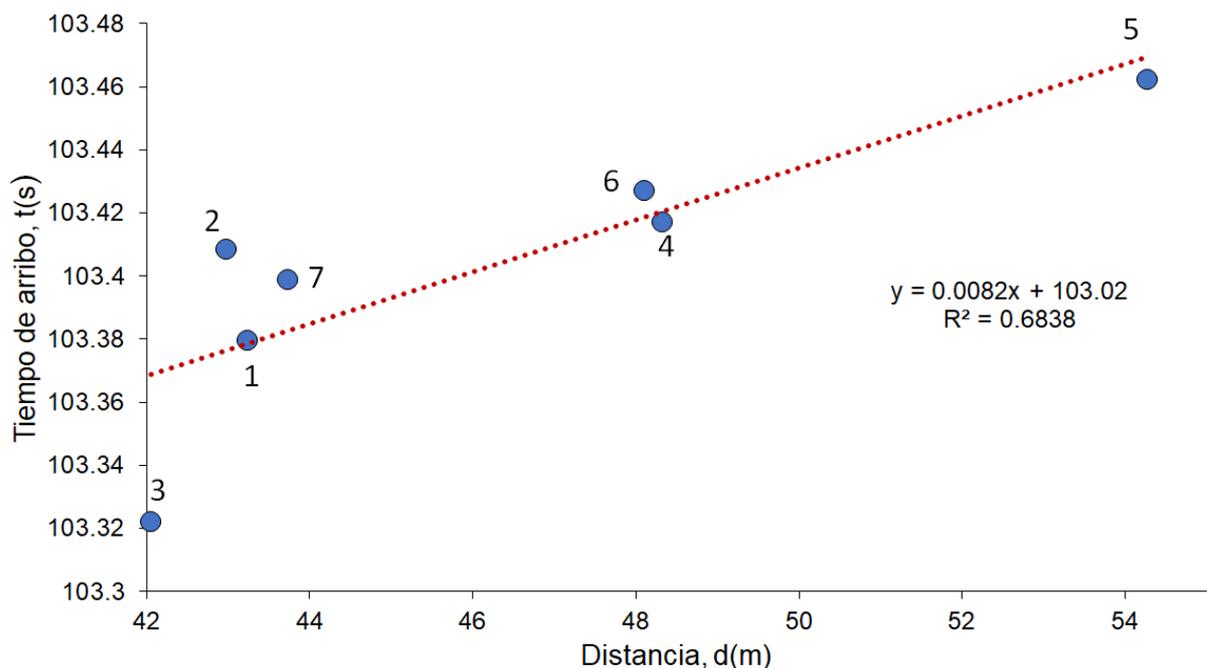


Figura 42. Gráfica que representa los tiempos de arribo de cada uno de los sensores respecto a su distancia con la fuente de sonido.

Al obtenerse el tiempo de retardo de la señal entre sensores y la distancia entre estos, fue posible calcular la dirección de la propagación de la onda de choque (ángulo), este se estimó a partir del punto medio de la distancia entre sensores. El ángulo correspondiente en la dirección al punto medio es hacia el sensor que se encuentra más cercano a la fuente de sonido. Para obtener el ángulo de dirección nos basamos en las fórmulas que se encuentran en el apartado: 2.5.1 Localización de tirador mediante la medición tiempo de retardo. Los resultados obtenidos se puede consultar en el apéndice J, tabla J4.

Realizamos dos estimaciones: el primero conociendo las distancias entre los sensores y la fuente de sonido, ya que de ambos elementos conocemos su ubicación a través del GPS. El segundo en función de los tiempos de arribo, es decir, si la señal llega mucho más rápido al sensor, quiere decir que este se encuentra cerca de la fuente de sonido. Siendo que, en un contexto forense lo único que conoceremos será la posición de los sensores y los tiempos de arribo. El investigador se basará en el tiempo de arribo para establecer la cercanía entre el sensor y la fuente de sonido.

En la Fig 43. se observan todas las posibles direcciones hacia la fuente de sonido. El trazo de los ángulos se hizo a través del software libre *Tracker Video Analysis and modeling tool*.

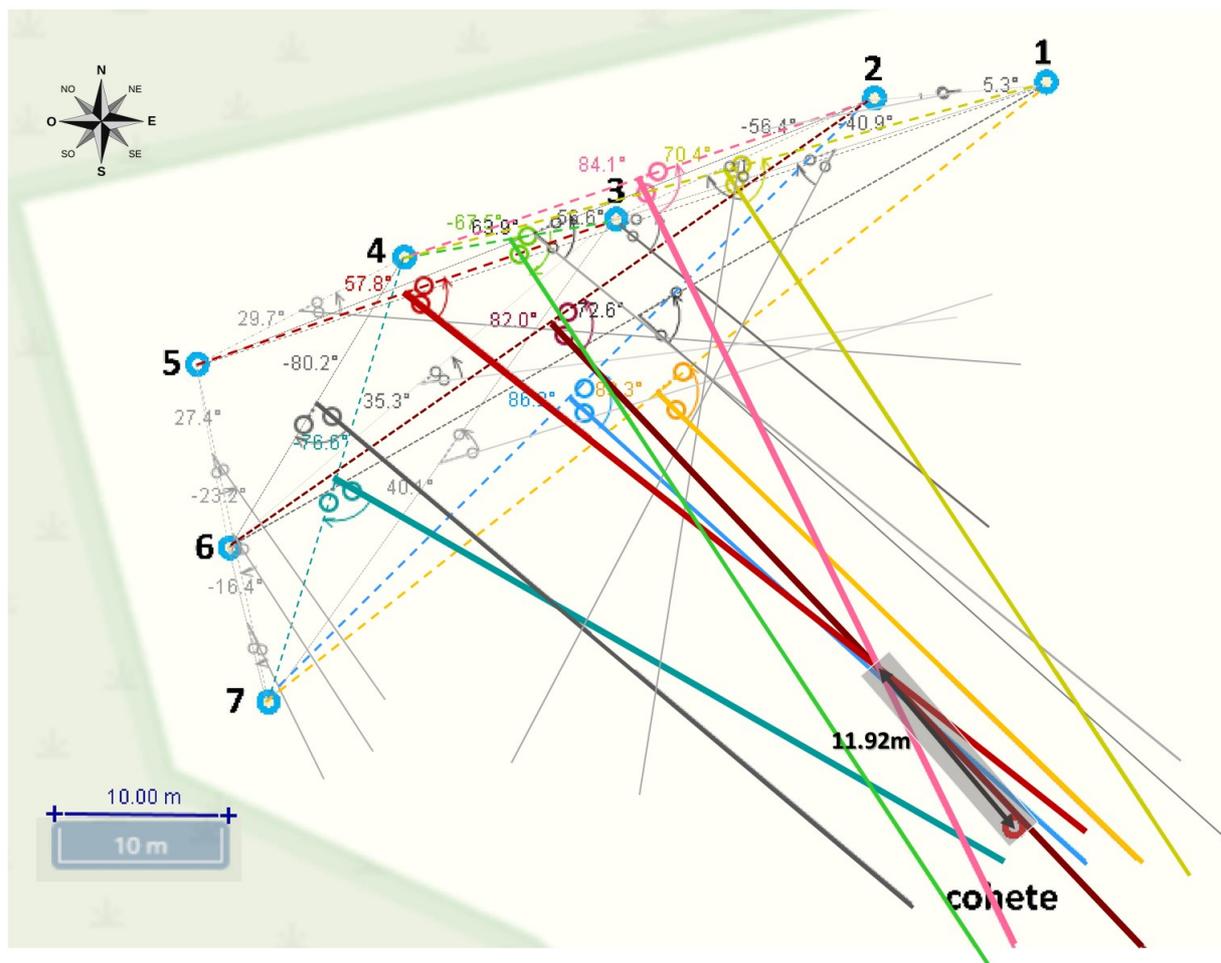


Figura 43. Esquema que representa las posibles direcciones para ubicar la fuente de sonido conociendo la distancia de cada sensor con relación a la fuente sonido.

El esquema de la Fig. 43 se muestran líneas de colores y en escala de grises que indican la direccionalidad hacia la posible ubicación de la fuente de sonido. Las líneas en escala de grises representan las direcciones más alejadas a la fuente de sonido; mientras que, las líneas de colores representan las más cercanas.

En color guinda, podemos visualizar el ángulo cuya direccionalidad se acerca más a la fuente de sonido, este se calculó a partir del par de sensores (2,6). Seguidamente, en color azul se encuentra el ángulo obtenido entre los sensores (2,7). En color rojo el ángulo entre los sensores (3,5). En color verde agua entre los sensores (4,7). En color amarillo (1,7). En color rosa (2,4). Los sensores (1,4) en verde limón. El par (3,4) en verde. En total, obtuvimos 8 resultados, cuya direccionalidad se aproxima más hacia la posición del cohete.

También, podemos observar que las líneas en color guinda, rosa y rojo que se intersectan entre sí. La distancia entre el punto de intersección y el cohete es de 11.92 m. A mayor número de líneas que intersectan, mayor será la probabilidad de que sea ese el punto en donde se ubique el cohete.

Seguidamente, encontramos otras direccionalidades que si bien no se se focalizan hacia la fuente de sonido, podríamos indicarnos una orientación cardinal sobre la ubicación de fuente de sonido. La relación entre los pares de sensores: (4,6), (2,5), (1,6), (1,5), (5,6), (6,7) y (5,7). indican una direccionalidad hacia el sur. La relación entre los sensores (3,6), (3,7), (4,5), indican que la fuente de sonido se ubica en el lado este. Estos resultados pueden indicarnos hacia qué punto cardinal se encuentra el origen del sonido, siendo que, la posición en la que el cohete se ubica es el lado sureste. Por lo tanto, los resultados no están del todo alejados.

Finalmente, la relación entre sensores (2,3), (1,3) y (1,2) indican que la fuente de sonido se lado suroeste. Estos últimos tres resultados fueron los más alejados a lo esperado.

Así pues, de 7 sensores obtuvimos un total de 21 resultados, 8 focalizan hacia la fuente de sonido, 10 resultados nos orientan sobre el punto cardinal en donde se encuentra el cohete y 3 fueron los resultados cuya ángulo de dirección está orientado en sentido opuesto a posición del origen del estruendo. Por tanto, consideramos que los resultados obtenidos de las mediciones fueron aceptables, ya que solo 3 mediciones fueron erróneas.

Posteriormente, a fin de ser transparentes en nuestros resultados, hemos realizado un siguiente esquema que muestra las direccionalidades hacia donde se ubica la fuente de sonido en función de los tiempos de arribo. En un contexto real, nos basaremos en los tiempos de arribo para determinar qué sensor se encuentran más cerca o más alejado de la posición del tirador. En la Fig. 44. se visualiza el resultado obtenido. Los datos para realizar los cálculos se encuentran en el apéndice J, tabla J3.

Las líneas de colores representan las direcciones más cercanas al cohete: en color guinda la relación de sensores (2,6), en color rojo (3,5), rosa (2,4), amarillo (1,7), azul (2,7),

verde agua (4,7), verde (3,4) y verde limón (1,4). Cabe señalar que, la relación de sensores (2,7) representado en color azul cambia la orientación del ángulo, ya que el impulso sonoro llega primero al sensor 7. El resto de los pares de sensores marcados de colores se mantiene igual al esquema anterior.

También, podemos observar varias intersecciones entre estas líneas. Por ejemplo, las líneas en color verde agua, rosa y azul se intersectan. La distancia del punto de intersección a la fuente de sonido es de 3 m. La segunda intersección está conformada por las líneas en color rosa, guinda y rojo. La distancia la segunda intersección hacia la posición del cohete es de 12.11m.

Seguidamente, encontramos otras direccionalidades que si bien no se focalizan hacia la fuente de sonido, podrían indicarnos una orientación cardinal sobre su ubicación. La relación entre los pares de sensores: (1,5), (1,6), (2,5), (5,6), (6,7) y (5,7). indican una direccionalidad hacia el sur. La relación entre los pares de sensores (3,6), (3,7), (4,5), (1,2) y (4,6) indican que la fuente de sonido se ubica en el lado este. Estos resultados pueden indicarnos hacia qué punto cardinal se encuentra el origen del sonido, siendo que, la posición en la que el cohete se ubica es el lado sureste. Por lo tanto, los resultados no están del todo alejados. Debemos señalar que la orientación del ángulo cambio para los pares de sensores (1,2) y (4,6) debido a que los sensores más cercanos, de acuerdo a los tiempos de arribo eran 1 y 4 para cada par de sensores, respectivamente.

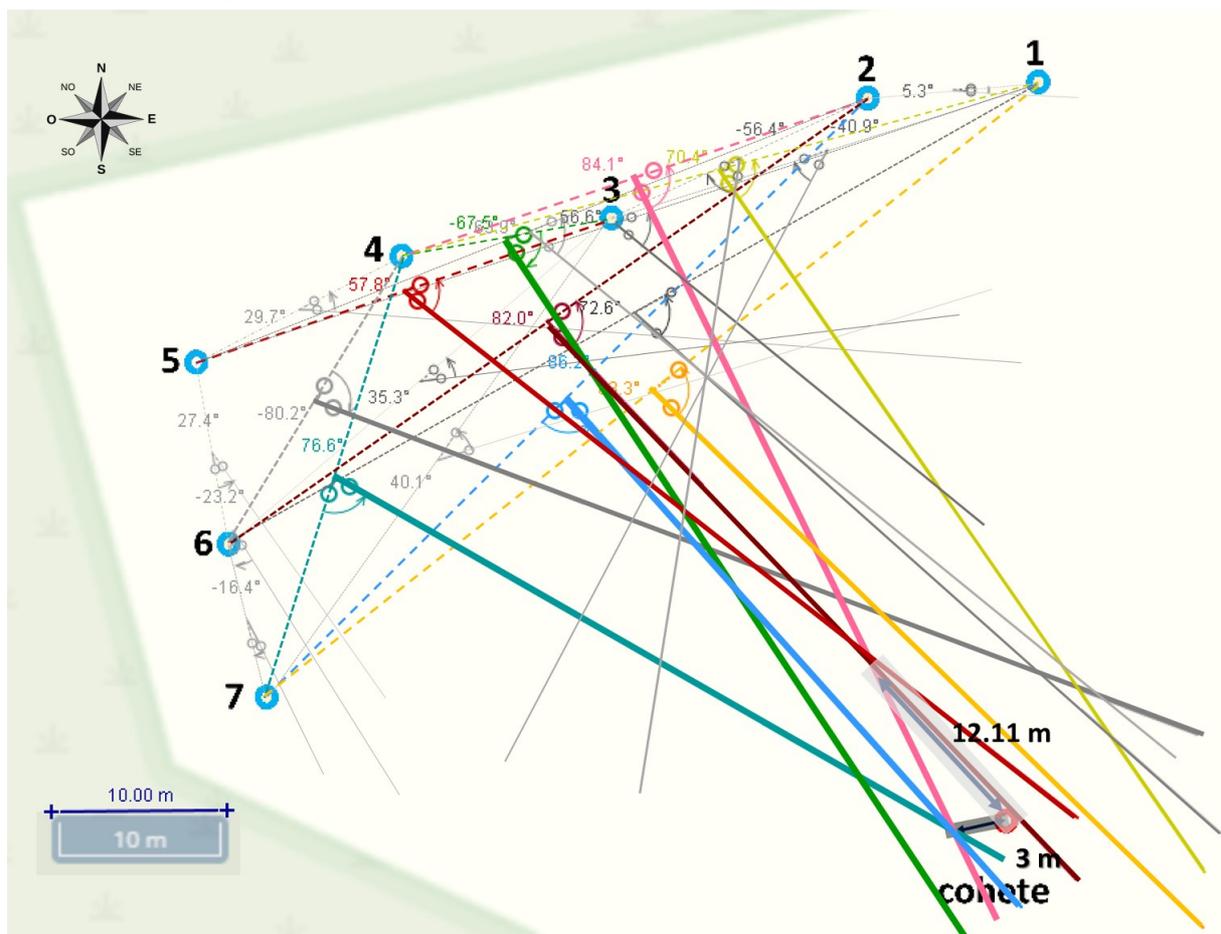


Figura 44. Esquema que representa las posibles direcciones para ubicar la fuente de sonido conociendo los tiempos de arribo para cada sensor.

Finalmente, la relación entre sensores (2,3), (1,3) indican que la fuente de sonido se lado suroeste. Estos últimos dos resultados fueron los más alejados a lo esperado.

De los 21 resultados reportados: 8 indican una direccionalidad más cercana a la fuente, 11 resultados dan una orientación posible y 2 muestran orientación contraria a la posición del cohete.

Comparando los datos obtenidos de nuestras dos estimaciones realizadas, obtuvimos mejores resultados cuando se hizo la estimación en función de los tiempos de arribo, ya que obtuvimos 2 puntos de intersección: el primero a 3 m de la fuente y un segundo a 12.11 m. Sin embargo, la orientación de los ángulos se mantuvo casi igual, excepto para los pares de sensores (2,7),(1,2) y (4,6).

De acuerdo a los resultados obtenidos podemos decir lo siguiente: si los sensores que han capturado la señal del disparo se encuentran muy alejados entre sí, podremos obtener un mejor resultado.

Al llegar a este apartado, considero que hemos logrado responder al título de esta tesis: ¿es viable basarnos en el registro acústico para localizar a un tirador de arma de fuego? la respuesta es sí. Basándonos en los resultados obtenidos tenemos altas posibilidades de éxito. Si bien, los datos recabados no proporcionan una ubicación exacta la ubicación del tirador, permite orientarnos sobre su localización.

Considero que el elemento que pudo haber afectado a los resultados fue la ubicación de los sensores a través de la aplicación de *google maps*, ya que como hemos mencionado, presenta un margen de error de  $\pm 4.9$  m. Otro elemento, que no se debe descartar es cálculo de los tiempos de arribo, sin embargo, creo que en este aspecto el error no es tan grave, ya que su valor podría ser de cienmilésimas de segundo. Finalmente, la velocidad del sonido en función de la temperatura, el error sería de  $\pm 0.6$  m/s por cada grado centígrado, pero no afectaría considerablemente los resultados.

Es así que, el análisis de registros acústicos podría funcionar mas adelante en futuras investigaciones en donde sea necesario estimar la ubicación del tirador. Además, la información obtenida de los archivos de audio podría brindar un soporte al resto de los dictámenes.

# CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

## 4.1 Conclusiones principales

Con base a los resultados obtenidos en este proyecto de tesis podemos mencionar las siguientes conclusiones:

- 1) El análisis del registro acústico es un método que permite estimar con aceptable precisión la posición del tirador de arma de fuego. Se debe considerar el método a emplear, las características del lugar, así como los dispositivos que grabaron el hecho.
- 2) En un escenario forense, existen diferentes marcas y modelos de dispositivos móviles que podrían registrar la onda sonora de un disparo. En consecuencia, las características del registro de la intensidad sonora del sensor del dispositivo varían en función de las características del teléfono móvil. Este es un factor importante a considerar por el experto en acústica. Por ello, es necesario llevar a cabo una calibración del dispositivo móvil sujeto a análisis, visualizando las características de los niveles de intensidad y frecuencia que estos pueden capturar.
- 3) Estimar la distancia entre el micrófono y el tirador del arma de fuego mediante el análisis de la intensidad registrada a través del dispositivo, es un método que proporciona resultados de baja precisión, depende principalmente de las características del transductor del dispositivo, así como de la función que viene integrada a este (Control de Ganancia Automática).
- 4) Es importante considerar la temperatura del momento en el que suscitó el hecho, ya que la velocidad del sonido cambia en función de la temperatura. Por lo tanto, el experto deberá consultar la temperatura de fuentes confiables como lo es el SMN, para obtener buenos resultados en sus cálculos.
- 5) Para localizar a un tirador de arma de fuego es importante la integración de diferentes disciplinas forenses, como la balística, acústica e informática. Cada una de estas, desde sus conocimientos aportará información relevante, misma que deberá ser compartida entre estas áreas.
- 6) La limitación principal del método TDOA es la falta de sincronización en los dispositivos móviles. En este trabajo lo realizamos artificialmente (por medio de la palmada). En investigaciones futuras se deben explorar otros medios para sincronizar los dispositivos. Sin embargo, no descartamos la idea que a través de fenómenos como el eco pueda solucionarse esta limitante. Al conocerse la fuente

que provoca el efecto de eco sería posible realizar la sincronización de los audios, tal y como lo hizo Rodolfo "Willy " Pregliasco en su investigación de caso. Este sería un trabajo interesante que más adelante podría desarrollarse.

- 7) En esta tesis, la aproximación realizada para estimar la posición de la fuente de sonido mediante tiempos de arribo, lo efectuamos considerando campo lejano (la distancia entre fuente de sonora y sensor es muy grande), por lo tanto utilizamos líneas rectas que nos indicarán la dirección hacia donde se ubicaba la fuente de sonido. Sin embargo, es probable que las posiciones en las que se ubican los sensores están todavía muy cerca de la fuente. Si este fuera el caso, se pueden utilizar hipérbolas en lugar de líneas. En donde los focos serían las fuentes de sonido y la intersección entre hipérbolas nos daría como resultado la fuente de sonido. Una explicación más detallada sobre ello, se puede observar en el apéndice K.

## 4.2 Prospectiva de la investigación

Si bien este trabajo muestra posibles soluciones al tema de investigación, también se requiere mejorar en varios aspectos los estudios realizados. En tal sentido, las áreas de oportunidad son:

- 1) La segunda caja es mejor que la caja de cartón, pero es mejor la cámara anecoica. Por tanto, conviene realizar una mejora a la caja. En el apéndice se muestra un diagrama de una propuesta de caja mejorada. Esta caja podría tener las siguientes dimensiones: 3 metros de largo, 80 cm de ancho y 80 cm de largo, de doble pared, cada pared deberá tener un grosor de 4 cm, la separación entre estas deberá ser de 15 cm, formando una cámara de aire, misma que puede ser rellanada de lana de vidrio o lana mineral. La base de la caja deberá estar cubierta de pelotas de tenis, mientras que el resto de las paredes deberá estar cubierta de espuma de poliuretano de alta densidad, pero con la misma forma de cuña. La tapa de la caja deberá sellar perfectamente, para evitar el ingreso de otras ondas de sonido externas a la medición. La construcción de una caja mejorada permitirá realizar calibraciones de dispositivos móviles de una mejor calidad. Además, los expertos en el área que carezcan de los recursos o las posibilidades de acceder a una cámara anecoica, podrían utilizar este recurso y obtener los mismos resultados. El diseño de esta caja se visualiza en el apéndice H.
- 2) En esta tesis, solo nos basamos en la temperatura como elemento que afecta la velocidad del sonido. Sin embargo, existen otros fenómenos que podrían afectar, como las condiciones de tiempo, de humedad, lluvia, entre otros.
- 3) Se requiere un mayor trabajo empírico respecto al tema, existen todavía diferentes áreas que se podrían explotar. Por ejemplo: la identificación de armas de fuego a través del análisis de la señal acústica y el análisis de los efectos de los fenómenos acústicos en un archivo de audio. En este caso podría ser el efecto de la transmisión,

al producirse un disparo en la habitación contigua desde donde se realizó la grabación, por mencionar algunos casos.

- 4) La acústica se ha empleado generalmente en la identificación y comparación de voces. Sin embargo, considero que podría explotarse en la caracterización acústica de cada arma con fines de identificación e incluso tratar de diferenciar entre tipos de cartucho (existen armas que pueden utilizar más de un tipo) o bien si se empleó algún tipo de supresor acústico.
- 5) Este trabajo se realizó sobre el plano XY, en futuros estudios, se debe hacer con las coordenadas XYZ. Es decir, podría realizarse la estimación la posición del sonido cuando este se encuentra a cierta altura. En nuestra experimentación no realizamos la estimación cuando el cohete explotó en el aire y creo que sería interesante conocer también ese dato. Sin embargo, no descartamos que en futuras investigaciones se pueda llevar a cabo, pues son diferentes las situaciones en las que puede acontecer un hecho. Por ejemplo, que el tirador se ubique en el último piso de un gran edificio.
- 6) Otra investigación que podría realizarse más adelante es cuando la fuente de sonido se encuentre en movimiento. En este trabajo, determinamos la posición de la fuente cuando esta se encuentra en una posición fija, pero en un contexto forense puede que el tirador realice la detonaciones desplazándose de un punto a otro.

### 4.3 Palabras finales

Esperamos que este trabajo sea un antecedente para otras personas puedan abordar con mayor profundidad el tema, debido a que en México y en nuestra Universidad, el análisis de señales de registros acústicos de disparos de arma de fuego ha sido poco explorado. Considero que aún falta mucho por investigar, tal y como lo mencione en la prospectiva. Quizás más adelante, investigadores deben desarrollar métodos y técnicas más sofisticadas basados en el análisis de señales acústicas que puedan ayudar a solucionar el problema de estimar la posición del tirador de un arma de fuego y así poder servir en la procuración de justicia.

# APÉNDICES

## APÉNDICE A: Líneas de ruta para realizar la localización de un tirador a partir de celulares

En esta tesis de licenciatura, proponemos una serie de etapas generales para analizar dispositivos electrónicos de audio grabación con el fin de obtener los datos sonoros que permitan localizar una fuente sonora de tipo impulsivo. En otras palabras, estudiar el archivo de sonido para poder ubicar la posición donde se accionó un arma de fuego. De alguna manera, esta lista es un resumen de lo realizado en esta tesis.

Primero, debemos asumir que esta clase de estudios es multidisciplinaria. Lo que implica que se requiere en trabajo en equipo entre el ministerio público y los peritos. Así la siguiente lista de acciones considera que existe tal armonía en los operadores de la investigación. La lista es la siguiente:

1. Sucede el hecho, por tanto hay pertinencia de la actuación pericial.
2. Se localizan los celulares a través de la investigación policial. (suponemos que estos dispositivos no se encuentran en el lugar de la investigación)
3. Siguiendo los protocolos de delitos cibernéticos, se preserva la evidencia de los dispositivos electrónicos (celulares).
  - A. Se envían los celulares al laboratorio de informática forense.
  - B. El perito en informática deberá realizar una imagen-forense del dispositivo.
  - C. Si a través del dispositivo se cuenta con archivo de audio relacionado al hecho, se procede a realizar su extracción.
  - D. Posteriormente, determinar si el equipo móvil contaba con el GPS activado en el momento del hecho.
    - a) En caso afirmativo, se procede a realizar una extracción de los metadatos del archivo de audio.
    - b) En caso negativo, se deberá realizar una triangulación de las llamadas telefónicas a través de las radiobases (mínimo 3). O bien, utilizar otro tipo de información para obtener su ubicación espacial.
4. Al finalizar la labor del perito en informática, el dispositivo móvil deberá ser enviado al Laboratorio de Acústica forense, en donde el perito deberá realizar la caracterización del micrófono del celular estudiado. El perito en acústica deberá recibir el archivo de audio extraído, con la finalidad de visualizar y analizar las características de la señal.
5. A través del perito en acústica se determina el intervalo de tiempo en que sucedió el hecho. Si es pertinente se contactará con el experto meteorológico para obtener el dato de la temperatura.
6. Finalmente, el perito en balística<sup>3</sup> recopila la información proporcionada por los demás especialistas. A través de los datos obtenidos y mediante un modelo físico-matemático determina la posición en la que se encontraba el tirador.
7. Se emite un dictamen conjunto entre peritos o bien los informes que integren estas acciones.

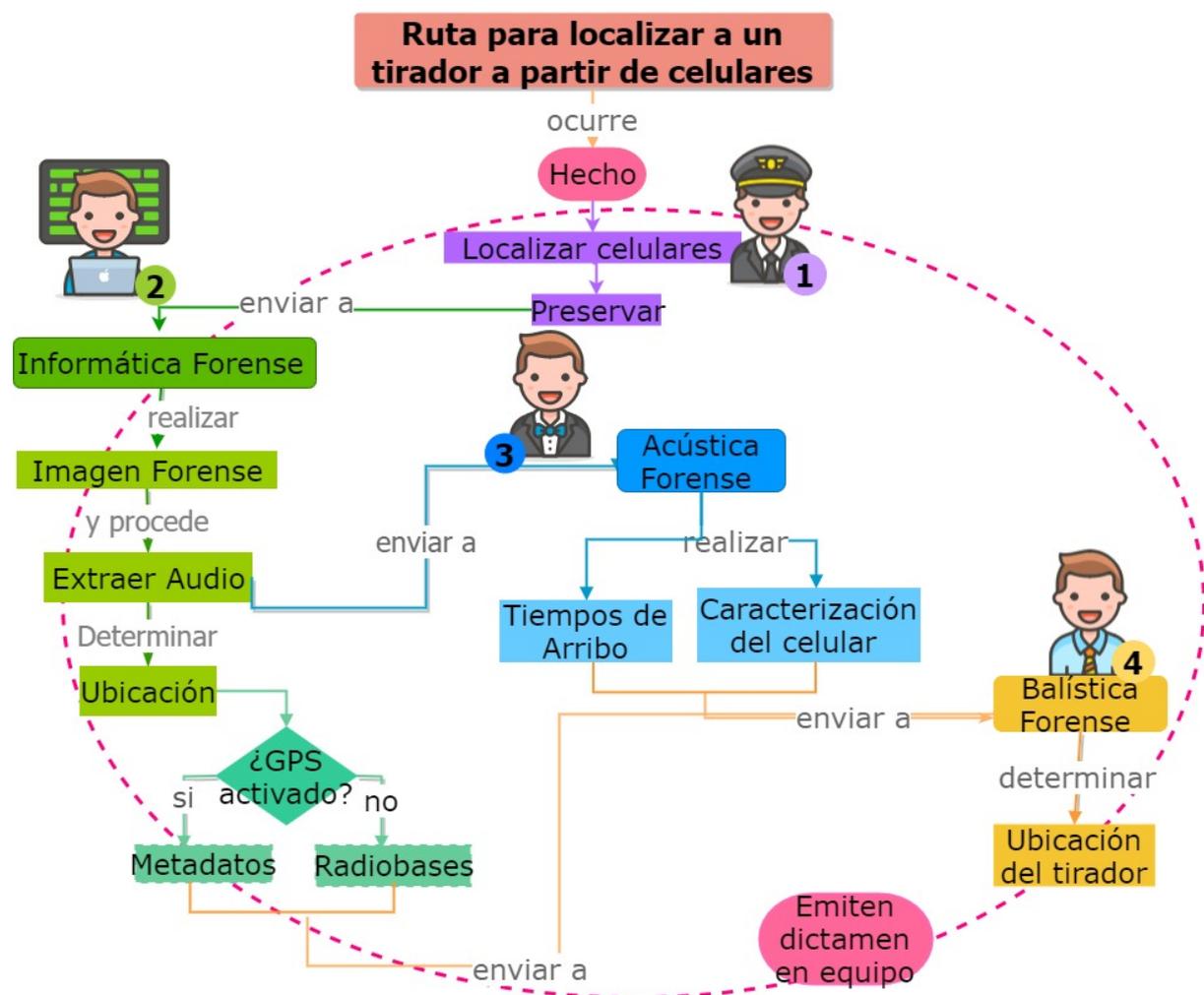
---

<sup>3</sup> En México, la pericial de física no es una especialidad oficial que alguna institución reconozca. Sin embargo, es de esperar que un perito en balística pueda auxiliar en este tema. O bien, se tendrá que recurrir a un consultor externo a la fiscalía.

El protocolo involucra varias disciplinas y áreas de conocimiento que permitan localizar la posición del tirador, cada una de estas deberán trabajar en conjunto para poder obtener un buen resultado, en caso de que alguna de estas no colabos errores en los resultados se verán reflejados.

La coordinación de la investigación, actualmente, es llevada por el agente del ministerio público, cuyo perfil está más inclinado hacia el área social. Es aquí, donde se insertaría la figura del científico forense, si bien no es un experto en todas las áreas, posee nociones de los conocimientos que tienen cada una de las especialidades. Entonces, el científico forense jugaría un rol importante en la coordinación de una investigación.

Con el fin de brindar una explicación visual de este propuesta protocolaria, presento el siguiente diagrama de flujo:



A1. Diagrama de flujo de la ruta para localizar a un tirador de arma de fuego a partir del análisis de telefonos celulares. Este diagrama puede aplicar en la investigación de fiscalías estatales y en la federal.

## APÉNDICE B: Datos abiertos y datos forenses (el problema de la obtención de información en periciales)

Durante esta tesis, al no obtener suficiente información sobre la temperatura, esta se solicitó mediante correo electrónico al SMN Servicio Meteorológico Nacional.

El día 9 de octubre de 2018 envié correo electrónico explicándoles que era estudiante de licenciatura UNAM y que requería datos históricos de la temperatura para construir un modelo matemático que me permitiese calcular la velocidad del sonido. Para realizarlo solicite las temperaturas registradas los días 27 y 28 de septiembre de 2018, en un horario entre las 11:00 a.m. y 3 p.m.

Sin embargo, pasaron tres meses sin recibir respuesta. Reenvié el correo electrónico el día 15 de noviembre de 2018, pero el hacerlo fue en vano.

Al darme cuenta que el SMN no me daría respuesta pues, ya habían transcurrido tres meses, opte por solicitar los datos de las temperaturas al INAI (Instituto Nacional de Acceso a la Información), enviándoles mi solicitud. Sin embargo, en el listado de los sujetos obligados a proporcionar información no se encontraba el Servicio Meteorológico Nacional, ni CONAGUA Comisión Nacional del Agua, qué es la dependencia central, así que opte por enviarla a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), organismo que engloba a las anteriores instituciones. Esto fue el día 9 de enero de 2019.

Tres días después, la SEMARNAT respondió a mi solicitud señalando que no era la institución competente para brindarme esa información, y que solo el SMN podría hacerlo, así que me proporcionaron el correo de la encargada de la Unidad de Transparencia de CONAGUA, para qué le solicitará la información. En el correo que le envié a esta persona, le explique el problema que había tenido con el SMN al no haber una respuesta por parte de ellos después de tres meses de haber solicitado su apoyo, e incluso hice mención de los nombres de las personas a las que les había solicitado la información.

Tres días después de haber enviado el correo a CONAGUA, recibí respuesta del responsable de del SMN, siendo esta persona a quien le solicite por primera vez la información.

Después de haber narrado toda esta historia, y de lo difícil que fue para mi el obtener los datos, puesto que tuve que pedir ayuda a instancias como el INAI. Me pongo a reflexionar sobre el papel del perito, quien debe emitir su dictamen en un plazo no mayor a 24 horas, ¿serán tres meses el tiempo de respuesta hacia el perito? Quizá sea que, como soy solo una estudiante de licenciatura poco me han tomado en cuenta. Esperaría que todos los ciudadanos pudieran contar con esta información, pero si este tipo de instituciones acostumbra a dar una respuesta tardía, es sumamente preocupante, sobre todo porque el sistema de justicia requiere respuestas prontas y oportunas para dar solución a un caso.

## APÉNDICE C: Códigos de Octave programados

A continuación, se presenta a través de una captura de pantalla los códigos que realizamos para obtener los gráficos mostrados en esta tesis. De tal manera que, el lector pueda reproducir los resultados obtenidos.

### C.1. Onda Cuadrada

En esta rutina realizamos la sumatoria de varias ondas simples para obtener la Figura. 5

```

1 %Grafica de onda cuadrada resultado de sumatoria de ondas simples
2 %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3 %Fecha: 21-OCT-2018
4 clc; clear; close all; %Limpieza de la pantalla de memoria y ventana
5 %DATOS DE ENTRADA
6 k=1; x=(0:0.01:10);
7 %Ondas simples
8 y1=sin(k*x);
9 y2=(1/3) *sin((3*k)*x);
10 y3=(1/5) *sin((5*k)*x);
11 y4=(1/7) *sin((7*k)*x);
12 hold on
13 %Graficando ondas simples
14 plot (x,y1,'color',[0.0,0.0,0.0], 'linewidth',13);
15 plot (x,y2, 'color',[0.2,0.2,0.2], 'linewidth',10);
16 plot (x,y3, 'color',[0.4,0.4,0.4], 'linewidth',9);
17 plot (x,y4, 'color',[0.6,0.6,0.6], 'linewidth',6);
18 %Graficando el resultado de la sumatoria de ondas
19 plot(x, + y1+y2+y3+y4, 'color',[0.8,0.0,0.2], 'linewidth',15);
20 hold off
21 %
22 xlabel('Tiempo, (s)', 'fontName','Arial','FontSize', 30);
23 ylabel('Nivel de Presión Sonora,(u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize', 30);
24 set(gca,'fontName','Arial','FontSize',30)
25
26 %FIN DEL GUIÓN

```

## C.2. Velocidad del sonido

En esta rutina realizamos una gráfica que nos permitiese entender el comportamiento de la velocidad del sonido de acuerdo a las variaciones de temperatura,obteniéndose la figura 7

```

1 %Grafica para calcular la velocidad del sonido en funcion de la Temperatura
2 %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3 %Fecha: 03-nov-2018
4 clc; clear; close all; %Limpieza de la pantalla de memoria y ventana
5 %DATOS DE ENTRADA
6 c_0=331; %Velocidad del sonido a 0° C
7 T= -89.2:1:56.7; % Temperatura mínima y máxima reportada en el mundo
8 T_cdmx= -10:38.5;% Temperatura mínima y máxima reportada en la CDMX
9 %CALCULOS
10 c= c_0*sqrt (1+T/273); %Calculando la velocidad del sonido a nivel mundial
11 c_cdmx = c_0*sqrt (1+ T_cdmx/273);%Calculando la Velocidad del sonido en CDMX
12 %GRAFICANDO
13 hold on
14 plot(T, c, 'h','color',[0.0,0.4,0.8],'LineWidth',30)%
15 plot(T_cdmx, c_cdmx, 'o','color',[0.8, 0.0, 0.4],'Markersize',25,'LineWidth',2)
16 hold off
17 xlabel('Temperatura, T(°C)','fontName','Arial','FontSize',30);
18 ylabel('Velocidad, v (m/s)','fontName','Arial','FontSize',30);
19 set(gca,'FontSize',30);
20 %
21 text (-98, 265 ,{'Antártida';'271.59'}, 'fontName','Arial','FontSize',25);
22 text (48,370, {'California';'363.26'},'fontName','Arial','FontSize',25);
23 text (17, 358 ,{'Máxima';'353.29'},'fontName','Arial','FontSize',25)
24 text (-8,319, {'Mínima';'324.88'},'fontName','Arial','FontSize',25);
25 %
26 h = legend ('Temperatura Mundial','Temperatura CDMX');
27 legend (h, 'location','south');
28 set (h,'fontName','Arial','fontsize',25);
29 %FIN DEL GUIÓN

```

### C.3. Oscilograma y Espectro de 250 Hz obtenido de la medición en caja de cartón. En esta rutina realizamos dos gráficos: oscilograma y espectro a 250 Hz.

```

1  % Oscilograma y Espectro de 250 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3  %Fecha: 27-NOV-2018
4  clear; clc; close all; % Limpieza de Pantalla y memoria
5  [s,f]=audioread('250.wav'); % leyendo el archivo y frecuencia de muestreo
6  t=size(s,1)/f; % tiempo de duracion
7  x=0:1/f:t;
8  r=s(:,1); % canal
9  %
10 subplot(2,1,1);
11 %Graficar señal de audio respecto al tiempo
12 plot(x(2:end),r, 'color',[0.2,0.2,0.4]),xlim([0,t]);
13 xlabel('Tiempo(s)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
14 ylabel('Amplitud Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
15 set(gca, 'fontName','Arial','FontSize',20)
16 ..
17 %Graficar la FFT (Fast Fourier Transform)
18 subplot(2,1,2);
19 %Calcular la FFT
20 L=length(s);
21 Y=fft(s);
22 A=Y(1:end/2);
23 M=abs(A);
24 F=linspace(0,f/2,length(A));
25 %Graficar la mitad de la señal en función de la frecuencia
26 plot(F,M, 'color',[0.2,0.2,0.4], 'linewidth',3);
27 axis([0 500 0 8000]);
28 xlabel('Frecuencia (Hz)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
29 ylabel('Intensidad Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
30 set(gca, 'fontName','Arial','FontSize',20)
31 %FIN DEL GUIÓN

```

### C.4. Oscilograma y Espectro de 2000 Hz obtenido de la medición en caja de cartón. En esta rutina realizamos dos gráficos: oscilograma y espectro a 2000 Hz.

```

1  % Oscilograma y Espectro de 2000 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3  %Fecha: 27-NOV-2018
4  clear; clc; close all; % Limpieza de Pantalla y memoria
5  [s,f]=audioread('2000.wav'); % leyendo el archivo y frecuencia de muestreo
6  t=size(s,1)/f; % tiempo de duracion
7  x=0:1/f:t;
8  r=s(:,1); % canal
9  %
10 subplot(2,1,1);
11 %Graficar señal de audio respecto al tiempo
12 plot(x(2:end),r, 'color',[0.2,0.2,0.4]),xlim([0,t]);
13 xlabel('Tiempo(s)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
14 ylabel('Amplitud Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
15 set(gca, 'fontName','Arial','FontSize',20)
16 ..
17 %Graficar la FFT (Fast Fourier Transform)
18 subplot(2,1,2);
19 %Calcular la FFT
20 L=length(s);
21 Y=fft(s);
22 A=Y(1:end/2);
23 M=abs(A);
24 F=linspace(0,f/2,length(A));
25 %Graficar la mitad de la señal en función de la frecuencia
26 plot(F,M, 'color',[0.2,0.2,0.4], 'linewidth',3);
27 axis([0 500 0 8000]);
28 xlabel('Frecuencia (Hz)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
29 ylabel('Intensidad Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
30 set(gca, 'fontName','Arial','FontSize',20)
31 %FIN DEL GUIÓN

```

### C.5. Oscilograma y Espectro de 20000 Hz obtenido de la medición en caja de cartón.

En esta rutina realizamos dos gráficos: oscilograma y espectro a 20000 Hz.

```

1  %Oscilograma y Espectro de 20000 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3  %Fecha: 27-NOV-2018
4  clear; clc; close all; %Limpiar variables y pantalla
5  %Graficar señal de audio respecto al tiempo
6  [s,f]=audioread('20000.wav'); %leyendo el archivo y su frecuencia de muestreo
7  t=size(s,1)/f; %Calcular la duracion de la señal
8  x=0:1/f:t;
9  r=s(:,1);
10  %Graficar señal de audio respecto al tiempo
11  subplot(2,1,1);
12  plot(x(2:end), r, 'color',[0.8,0.0,0.4]),xlim([0,1.6]); %graficando señal en función del tiempo
13  xlabel('Tiempo(s)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
14  ylabel('Amplitud Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
15  set(gca,'fontName','Arial','FontSize',20)
16  %Graficar la FFT (Fast Fourier Transform)
17  subplot(2,1,2);
18  L=length(s);
19  subplot(2,1,2);
20  Y=fft(s);
21  A=Y(1:end/2);
22  M=abs(A);
23  F=linspace(0,f/2,length(A));
24  plot(F,M,'color',[0.8,0.0,0.4],'linewidth',3);
25  axis([50 100 0 70]);
26  xlabel('Frecuencia (Hz)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
27  ylabel('Intensidad Relativa (u.a.)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
28  set(gca,'fontName','Arial','FontSize',20)
29  %FIN DEL GUIÓN

```

**C.6. Oscilograma y Espectro de 7000 Hz obtenido de la medición en caja de cartón.** En esta rutina realizamos dos gráficos: oscilograma y espectro a 7000 Hz.

```

1  %Oscilograma y Espectro de 7000 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr.Vicente Torres Zuñiga
3  %Fecha: 27-NOV-2018
4  clear; clc; close all; %Limpiar variables y pantalla
5  %Graficar señal de audio respecto al tiempo
6  [s,f]=audioread('7000.wav'); %leyendo el archivo y su frecuencia de muestreo
7  t=size(s,1)/f; %Calcular la duración de la señal
8  x=0:1/f:t;
9  r=s(:,1);
10  %Graficar señal de audio respecto al tiempo
11  subplot(2,1,1);
12  plot(x(2:end), r, 'color',[0.6,0.8,0.4]),xlim([0,t]); %graficando la señal respecto a de tiempo
13  xlabel('Tiempo(s)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
14  ylabel('Amplitud relativa [u.a.]', 'fontName','Arial','FontSize',20);
15  set(gca,'fontName','Arial','FontSize',20)
16  %
17  %Graficar la FFT (Fast Fourier Transform)
18  subplot(2,1,2);
19  L=length(s);
20  subplot(2,1,2);
21  Y=fft(s);
22  A=Y(1:end/2);
23  M=abs(A);
24  F=linspace(0,f/2,length(A));
25  %Graficar la mitad de la señal en función de la frecuencia
26  plot(F,M,'color',[0.6,0.8,0.4],'linewidth',3);
27  xlabel('Frecuencia (Hz)', 'fontName','Arial','FontSize',20);
28  ylabel('Intensidad Relativa [u.a.]', 'fontName','Arial','FontSize',20);
29  set(gca,'fontName','Arial','FontSize',20)
30  %FIN DEL GUIÓN

```

Respecto, a los códigos que se emplearon para generar las gráficas de intensidades relativas capturadas a través de la segunda caja, corresponden a los mismo esquema de la primera caja. Por lo tanto, consideramos que no es necesario repetir dichos códigos.

### C.7. Gráficas de las Intensidades relativas a frecuencias constantes (250, 2000 y 2000 Hz) obtenido de la medición en la segunda caja.

```

1  % Intensidades relativas a frecuencias constantes de 250,2000 y 20000 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr. Vicente Torres Zúñiga.
3  %Fecha: 28- ABRIL- 2019
4  clc, clear all; close all; %Limpieza de pantalla y memoria
5  %Leyendo los archivos con los valores de intensidad e incertidumbre
6  load a.txt; load a1.txt, load b.txt; load b1.txt; load c.txt; load c1.txt;
7
8  %Intensidades generadas a traves del ordenador
9  entrada = [6.0205, 9.54, 12.04, 15.56, 18.061, 21.58, ...
10 24.08, 27.604, 30.37, 33.44, 36.12, 38.48, 39.82, 40.98, 42.007]
11
12 hold on
13 %Graficando intensidad e incetidumbre a 250 Hz
14 p1=plot( entrada,a(1,:) +a1(1,:), 'v','color',[1.0,0.6,0.0],'Markersize',18, ...
15 'MarkerFaceColor',[1.0,0.6,0.0], xlim ([0, 45]))
16 p2=plot( entrada,a(1,:) -a1(1:), '^', 'color',[1.0,0.6,0.0],...
17 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[1.0,0.6,0.0],xlim ([0, 45]))
18 p3=plot( entrada,a(1:), 'pentagram', 'color',[0.0,0.4,0.8], ....
19 'Markersize',20, 'MarkerFaceColor',[0.0,0.4,0.8],xlim ([0, 45]))
20
21 %Graficando intensidad e incetidumbre a 2 KHz
22 p4=plot( entrada,b(1:)+b1(1:), 'v', 'color',[0.6,0.8,0.4], ...
23 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45]))
24 p5=plot( entrada,b(1:)-b1(1:), '^', 'color',[0.6,0.8,0.4],...
25 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45])) % arriba )
26 p6=plot( entrada,b(1:), 'pentagram', 'color',[0.8,0.0,0.6], ....
27 'Markersize',20, 'MarkerFaceColor',[0.8,0.0,0.6],xlim ([0, 45]))
28
29 %Graficando intensidad e incetidumbre a 20 KHz
30 p7=plot( entrada,c(1:)+c1(1:), 'v','color',[0.6,0.6,0.6], ....
31 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.6,0.6],xlim ([0, 45]))
32 p8=plot( entrada,c(1:)-c1(1:), '^', 'color',[0.6,0.6,0.6],....
33 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.6,0.6],xlim ([0, 45]))
34 p9=plot( entrada,c(1:), 'pentagram', 'color',[0.4,0.2,0.8], ...
35 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.4,0.2,0.8],xlim ([0, 45]))
36 hold off
37
38 %etiquetas del eje de ordenadas y absisas
39 xlabel('Intensidad de entrada, I [dB'],'FontSize',30);
40 ylabel('Intensidad relativa, I.R. (u.a.)','FontSize',30);
41 set(gca,'FontSize',30);
42

```

## C.8. Gráficas de las Intensidades relativas a frecuencias constantes (250, 2000, 7000 y 20000 Hz) obtenido de la medición en la Cámara Anecoica

```

1  % Intensidades relativas a frecuencias constantes de 250,2000, 7000 y 20000 HZ
2  %Autor: Elizabeth Tellez Cervantes y Dr. Vicente Torres Zúñiga.
3  %Fecha: 28- ABRIL- 2019
4  clc, clear all; close all; %Limpieza de pantalla y memoria
5  %Leyendo los archivos con los valores de intensidad e incertidumbre
6  load a.txt; load a1.txt, load b.txt; load b1.txt; load c.txt; load c1.txt;
7
8  %Intensidades generadas a traves del ordenandor
9  entrada = [6.0205, 9.54, 12.04, 15.56, 18.061, 21.58, ...
10 24.08, 27.604, 30.37, 33.44, 36.12, 38.48, 39.82, 40.98, 42.007]
11
12 hold on
13 %Graficando intensidad e incetidumbre a 250 Hz
14 p1=plot( entrada,a(1,:) +a1(1:), 'v','color',[1.0,0.6,0.0],'Markersize',18, ...
15 'MarkerFaceColor',[1.0,0.6,0.0], xlim ([0, 45]))
16 p2=plot( entrada,a(1,:) -a1(1:),'^', 'color',[1.0,0.6,0.0],...
17 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[1.0,0.6,0.0],xlim ([0, 45]))
18 p3=plot( entrada,a(1:), 'pentagram', 'color',[0.0,0.4,0.8], ....
19 'Markersize',20, 'MarkerFaceColor',[0.0,0.4,0.8],xlim ([0, 45]))
20
21 %Graficando intensidad e incetidumbre a 2 KHz
22 p4=plot( entrada,b(1:)+b1(1:), 'v', 'color',[0.6,0.8,0.4], ...
23 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45]))
24 p5=plot( entrada,b(1:)-b1(1:),'^', 'color',[0.6,0.8,0.4],...
25 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45])) % arriba )
26 p6=plot( entrada,b(1:), 'pentagram', 'color',[0.8,0.0,0.6], ....
27 'Markersize',20, 'MarkerFaceColor',[0.8,0.0,0.6],xlim ([0, 45]))
28
29 %Graficando intensidad e incetidumbre a 7 KHz
30 p4=plot( entrada,b(1:)+b1(1:), 'v', 'color',[0.6,0.8,0.4], ...
31 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45]))
32 p5=plot( entrada,b(1:)-b1(1:),'^', 'color',[0.6,0.8,0.4],...
33 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.8,0.4],xlim ([0, 45])) % arriba )
34 p6=plot( entrada,b(1:), 'pentagram', 'color',[0.8,0.0,0.6], ....
35 'Markersize',20, 'MarkerFaceColor',[0.8,0.0,0.6],xlim ([0, 45]))
36
37 %Graficando intensidad e incetidumbre a 20 KHz
38 p7=plot( entrada,c(1:)+c1(1:), 'v','color',[0.6,0.6,0.6], ....
39 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.6,0.6],xlim ([0, 45]))
40 p8=plot( entrada,c(1:)-c1(1:),'^', 'color',[0.6,0.6,0.6],....
41 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.6,0.6,0.6],xlim ([0, 45]))
42 p9=plot( entrada,c(1:), 'pentagram', 'color',[0.4,0.2,0.8], ...
43 'Markersize',18, 'MarkerFaceColor',[0.4,0.2,0.8],xlim ([0, 45]))
44 hold off
45
46 %etiquetas del eje de ordenadas y absisas
47 xlabel('Intensidad de entrada, I [dB]','FontSize',30);
48 ylabel('Intensidad relativa, I.R. (u.a.)','FontSize',30);
49 set(gca,'FontSize',30);
50
51 %Colocando leyendas
52 h=legend([p3,p6, p9, p1, p4, p7],{'Intensidad relativa 250 Hz',...
53 'Intensidad relativa 2 kHz', 'Intensidad relativa 20 kHz',....
54 'Incertidumbre 250 Hz','Incertidumbre 2 kHz', 'Incertidumbre 20 kHz'})
55 legend(h, 'location','northwest');
56 legend('boxoff')
57 set (h,'fontName','Arial','fontsize',12);

```

## APÉNDICE D: Resultados obtenidos de la calibración de teléfonos celulares

<b>Intensidad de Entrada (dB)</b>	<b>250 Hz</b>	<b>2,000Hz</b>	<b>20, 000 Hz</b>
6.0205	0.070238	0.044392	0.0047903
9.5400	0.103123	0.056046	0.008056
12.0400	0.134467	0.072886	0.010176
15.5600	0.200898	0.085280	0.013269
18.0610	0.265529	0.118332	0.011336
21.5800	0.367681	0.169833	0.014023
24.0800	0.412878	0.222617	0.018386
27.6040	0.505596	0.319919	0.023425
30.3700	0.545942	0.384359	0.01798
33.4400	0.623744	0.442820	0.022382
36.1200	0.676699	0.505610	0.019256
38.4800	0.712031	0.559841	0.013933
39.8200	0.732760	0.599767	0.023824
40.9800	0.739959	0.631443	0.039057
42.0070	0.743847	0.648065	0.022701

Tabla D.1: Valores de intensidad de entrada y salida, obtenidos de las mediciones realizadas en la segunda caja.

<b>Intensidad de Entrada</b>	<b>250 Hz</b>	<b>2,000Hz</b>	<b>7 000 Hz</b>	<b>20 000 Hz</b>
6.0205	0.0028842	0.0029626	0.0024533	0.001553
9.5400	0.0038278	0.0039337	0.0034802	0.0015411
12.0400	0.0047681	0.0048651	0.0042877	0.0015308
15.5600	0.0065216	0.0068365	0.0059567	0.0016559
18.0610	0.0085583	0.0089304	0.0078113	0.0014795
21.5800	0.0139264	0.0126874	0.0107806	0.0015131
24.0800	0.0179520	0.0163586	0.0147284	0.0015631
27.6040	0.0251242	0.0246613	0.0202490	0.0015811
30.3700	0.0337265	0.0332635	0.0295023	0.0016211
33.4400	0.0464731	0.0464359	0.0413544	0.0016806
36.1200	0.0622369	0.0624133	0.0550085	0.001452
38.4800	0.0804971	0.0816824	0.0711404	0.0014938
39.8200	0.0926868	0.0945007	0.0829532	0.0016824
40.9800	0.1059592	0.1080783	0.0907391	0.0014362
42.0070	0.1148502	0.1175394	0.1030463	0.0014984

Tabla D.2: Valores de intensidad de entrada y salida, obtenidos de las mediciones realizadas en la Cámara Anecoica.

## APÉNDICE E: Foros en los que se presentó el proyecto.



Figura E.1: Constancia recibida en el el tercer foro de Avances de Investigación Estudiantil , de la Red de Ciencias Forenses CONACYT, Ciudad Universitaria, 11 de septiembre de 2018.



# Aplicación de teléfonos celulares en la ecolocalización de tiradores de armas de fuego

Elizabeth Tellez Cervantes; [edith\\_etc@gmail.com](mailto:edith_etc@gmail.com) Licenciatura en Ciencia Forense, UNAM

Vicente Torres Zúñiga; [vicentz@gmail.com](mailto:vicentz@gmail.com) Licenciatura en Ciencia Forense, UNAM

## Resumen

Realizamos la comparación del máximo de intensidad de onda generadas al hacer reventar un globo, y con ello demostrar la posibilidad de determinar la posición de la fuente de sonido. La intensidad es función de la distancia fuente- micrófono, así que realizamos pruebas en diferentes lugares abiertos y cerrados, y con la ayuda de 36 equipos telefónicos de distintos modelos, colocados en diversas posiciones conocidas con la finalidad de realizar el registro acústico.

## Introducción

### Onda

Es la propagación de una perturbación a partir de un estado normal  
Es flujo de energía a través de materia



### Sonido

Es una onda mecánica longitudinal que se propaga por un medio elástico



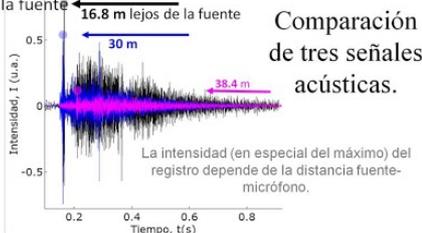
### Intensidad Sonora

Energía transportada por unidad de tiempo a través de la unidad de área de una superficie perpendicular a la dirección de propagación de la propia onda.

### Distancia > Intensidad



El cambio de intensidad varía con el cuadrado de la distancia de la fuente



Gracias a: UNAM-PAPIME-PE107216

## Metodología

Explanada de la Licenciatura en Ciencia Forense 4 3 2 1

Lugar Abierto

Los celulares fueron colocados en línea recta, cada uno de ellos con una distancia de separación equidistante.

Reventamos tres globos, cada uno de ellos en tres posiciones diferentes.

Audiovisual

30	31	32	33	34	35	36
24	25	26	27	28	29	
18	19	20	21	22	23	
12	13	14	15	16	17	
6	7	8	9	10	11	
1	2	3	4	5		

Lugar Cerrado

## Resultados

### Comparaciones

**Función Sort**

$$y = -0.252 \ln(x) + 1.1563$$

$$R^2 = 0.8034$$

**Lugar Abierto**

Los resultados obtenidos se ajustan mas a una línea de tendencia logarítmica

**Intensidad en tres puntos**

La intensidades varían respecto al punto desde donde se realizo la explosión del globo.

**Lugar Cerrado**

En ambos casos, algunos valores de las intensidades obtenidas no corresponden con la distancia desde la que se reventó el globo, es decir, algunas se incrementaron cuando la distancia era mas larga o viceversa.

## Conclusiones

1. Si se conoce la intensidad del sonido, se puede inferir la distancia fuente-micrófono
2. La variable que pudo influir en los resultado es: el modelo del equipo del celular con el que se realizo la grabación, por lo que seria de utilidad conocer este ultimo dato para determinar la posición desde donde se realizo un disparo.
3. Se debe considerar factores acústicos como la reverberación y el eco en este tipo de eventos

Figura E.2: Cartel presentado el tercer foro de Avances de Investigación Estudiantil, de la Red de Ciencias Forenses CONACYT, Ciudad Universitaria, 11 de septiembre de 2018.



Figura E.3: Constancia recibida del IV Congreso de Ciencia Forense de la presentación de carteles, octubre 2019.



# ¿Cómo usar smartphones para ubicar la detonación de arma de fuego?

---

Elizabeth Tellez Cervantes: [edith\\_etc@hotmail.com](mailto:edith_etc@hotmail.com) Licenciatura en Ciencia Forense, UNAM

Proyecto apoyado por: UNAM-PAPIME-PE115519

Vicente Torres Zúñiga: [vicentz@gmail.com](mailto:vicentz@gmail.com) Licenciatura en Ciencia Forense, UNAM

---

### Resumen/Abstract

- Estimamos la posición de la fuente de sonido a través de diferencia de tiempos de arribo, mediante el análisis de registro acústico capturado por teléfonos celulares.
- Proponemos la viabilidad de obtener la localización de un tirador de arma de fuego, por medio de la coordinación de varios perfiles profesionales.

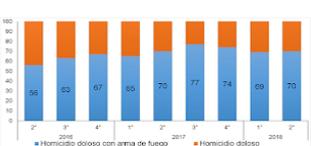
### Objetivos

- Estimar la posición relativa de un tirador de arma de fuego, a través del registro acústico del disparo capturado por teléfonos celular.
- Proponer una ruta de investigación forense para obtener la información relevante, en el procesamiento de indicios.
- Establecer los alcances y limitaciones del método diferencia del tiempo de arribo.

---

### Introducción

#### Homicidios dolosos en CDMX por arma de fuego

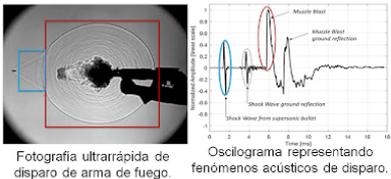


La problemática en la investigación se presenta cuando es necesario determinar la posición precisa del tirador de arma de fuego. La cifra ha crecido y se ha mantenido por arriba del 60%.

El registro acústico de un disparo es un elemento alternativo que puede contribuir en esclarecimiento de la investigación, sobre todo en casos en los que únicamente se cuenta con el registro de la detonación.

#### Acústica del disparo de un arma de fuego

- Shockwave**
  - Velocidad Supersónica.
  - Forma cónica.
  - Detrás del proyectil.
- Muzzle blast**
  - Alta energía.
  - Forma esférica.
  - La boca del cañón es el centro.



Fotografía ultrarrápida de disparo de arma de fuego. Oscilograma representando fenómenos acústicos de disparo.

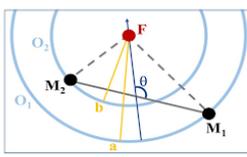
### Metodología



Instalación de la Unidad Canina DGAPSU: lugar del experimento. Cohete: fuente sonora. Celulares de diferentes marcas y modelos. Ubicación GPS.

---

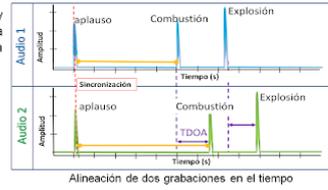
### Nosotros usamos: Diferencia del Tiempo de Arribo



$$T = \frac{d}{c \cos(\theta)}$$

Tiempo de arribo, Distancia entre sensores, Velocidad del sonido en función de la temperatura, Ángulo.

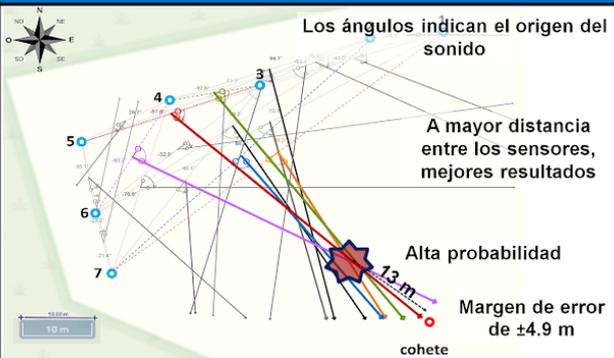
En un medio homogéneo y estable los frentes de onda emitidos por la fuente F viajarán a una velocidad c. El sonido alcanzará primero al micrófono M2, luego a M1. Empleando el retardo entre las señales de cada canal, una fuente puede ser localizada.



Alineación de dos grabaciones en el tiempo.

### Resultados

Los ángulos indican el origen del sonido



A mayor distancia entre los sensores, mejores resultados. Alta probabilidad. Margen de error de ±4.9 m.

---

### Conclusiones

1. El método de Diferencia del Tiempo de Arribo, es viable para localizar a un tirador de arma de fuego.
2. Si bien, no se logra obtener con precisión la localización de la fuente de sonido, permite orientarnos hacia que punto se podría ubicar para localizar a un tirador de arma de fuego.
3. Presenta como dificultad principal la sincronización de los teléfonos celulares.
4. Depende de la ubicación de los sensores, así como la distancia que existan entre estos.

---

### Referencias

1. Maher RC. Acoustical Characterization of Gunshots. IEEE Xplore; 2007. pp. 1-5
2. Maher RC. Principles of forensic audio analysis. Cham: Springer International Publishing; 2018.
3. Akman C. Multi Shooter Localization with Acoustic Sensors Master thesis. 2017.
4. Settles G, Grumstrup T, Miller J, Hargather M, Dodson L, Gatto J. Full- scale high-speed "Edgerton" retroreflective shadowgraphy of explosions and gunshots. 2005.

Figura E.4: Cartel presentado el IV Congreso de Ciencia Forense, octubre 2019.

## APÉNDICE F: Fichas técnicas de los materiales empleados para la construcción de la segunda caja de caracterización.



Recubrimientos y Aislantes Térmicos, S.A. de C.V.

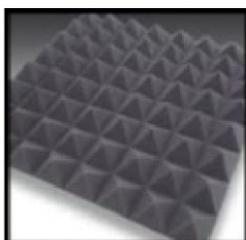
Fabricante de Aislantes Termoacústicos y Distribuidor de Materiales para la Construcción

### ESPUMA DE POLIURETANO 24FRF Ficha Técnica

PROPIEDAD	UNIDADES	ESPECIFICACION	RESULTADO	METODO DE PRUEBA
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	24 +1 - 2	23.5	ASTM D3574-95A
Fuerza a la tensión	Lb/pulg <sup>2</sup>	15 min.	17	ASTM D3574-95E
Elongación	%	120 min.	130	ASTM D3574-95E
Desgarre	Lb/pulg.	1.3 min.	1.8	ASTM D3574-95F
Firmeza IFD	Lb/50pulg <sup>2</sup>	28 min.	32	ASTM 3571-95-B1
Flamabilidad	Mm/min	101.6 máx.	MAE (PASA)	FMVSS 302

#### MANEJO Y ALMACENAMIENTO:

Evite fuentes de calor directo (flama. Chispas eléctricas, escapes de vehículos, cigarrillos encendidos, etc.) Ya que es un producto de poliuretanos denominado como material orgánico y es considerado retardante a la flama. Deberá almacenarse en lugares libres de humedad, de luz solar directa y con una buena ventilación. Cada cliente es responsable de confirmar la idoneidad del producto para su aplicación.



Av. Central # 44 y 46. Col. Rústica Xalostoc, Ecatepec, Estado de México. C.P. 55340  
Tel. /Fax: 01 (55) 55.69.23.43; 55.69.36.42 y 55.69.70.76  
Correo electrónico: info@ratsa.com / ratsa01@gmail.com Página web: www.ratsa.com

Figura F.1:Ficha técnica de la espuma de poliuretano.

PRODUCT DATA SHEET: ProRox® FSL 930<sup>NA</sup>  
 Issued: 05-06-2014 Supersedes: 01-09-2012

ROXUL®  
 ProRox® - Industrial Insulation

ProRox® FSL 930<sup>NA</sup>

NEW  
 NAME

Old name: ROXUL RHT® 40 FLEX

### Product description & application

ProRox® FSL 930<sup>NA</sup> is a flexible mineral wool (stone wool) thermal insulation board for intermediate to high temperature industrial applications.

### Product properties in accordance with ASTM C553

	Performance								Norms
	T <sub>m</sub> (°F)	100	200	300	400	500	600		
Thermal conductivity	λ (BTU.in/hr.ft <sup>2</sup> .°F)	0.26	0.32	0.39	0.51	0.63	0.78		ASTM C177
	T <sub>m</sub> (°C)	38	93	150	204	260	316		
	λ (W/mK)	0.037	0.046	0.056	0.074	0.091	0.112		
Maximum Service Temperature	Hot Surface Performance: 1200 °F- (650 °C)								ASTM C411
	Non-Combustible								ASTM E136 / CAN4 S114
	Linear Shrinkage: ≤ 1 % at 1200 °F- (650 °C)								ASTM C356
Reaction to fire	Surface burning characteristics								ASTM E84 (UL 723)
	Flame spread index = 0 ; Smoke development index = 0								CAN/ULC S102
Density	Actual Density = 3.5 lb/ft <sup>3</sup> - (56 kg/m <sup>3</sup> ) Nominal Density = 4.0 lb/ft <sup>3</sup>								ASTM C167
Corrosion resistance **	Stress Corrosion Cracking Tendency of Austenitic Stainless Steel = Passed								ASTM C692
	Corrosion of Steel = Passed								ASTM C665
Chemical Analysis **	(Salts: Cl <sup>-</sup> , F <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , SiO <sub>4</sub> <sup>4-</sup> ) Results fall within acceptability limits of ASTM C795								ASTM C795 (C871)
Thermal Resistance	R-Value / inch @ 75 °F				4.0 hr. ft <sup>2</sup> .°F/BTU				ASTM C518 (C177)
	RSI value / 25.4mm @ 24 °C				0.71 m <sup>2</sup> K/W				
Water Absorption/ Vapor Sorption	< 1 % Weight								ASTM C1104
Compliance	Complies with Type: VII								ASTM C553
ROXUL offers a wide range of facings, dimensions and thicknesses. Please contact ROXUL for further information.									

Surface Burning Characteristics: UL Listed to Canadian standard CAN/ULC S102 ; UL Classified to UL 723



NOTE: \*\* Provisions for lot testing may be required, consult manufacturer.

As ROXUL® Inc. has no control over installation design and workmanship, accessory materials or application conditions, ROXUL® Inc. does not warrant the performance or results of any installation containing ROXUL® Inc's products. ROXUL® Inc's overall liability and the remedies available are limited by the general terms and conditions of sale. This warranty is in lieu of all other warranties and conditions expressed or implied, including the warranties of merchantability and fitness for a particular purpose.

©/TM: US - owner Rockwool International A/S used under license; Canada - owner Roxul Inc.

**ROXUL®**  
 The Better Insulation™

**ROXUL INC.**  
 Milton, Ontario  
 Tel: 1-800-265-6878  
 Tel: 905-878-8474  
 Fax: 1-800-991-0110  
 Fax: 905-878-8077  
 Email: [contactus@roxul.com](mailto:contactus@roxul.com)  
[www.roxul.com](http://www.roxul.com)

Figura F.2: Ficha tecnica de lana mineral.

## APÉNDICE G: Resultados en lugar cerrado

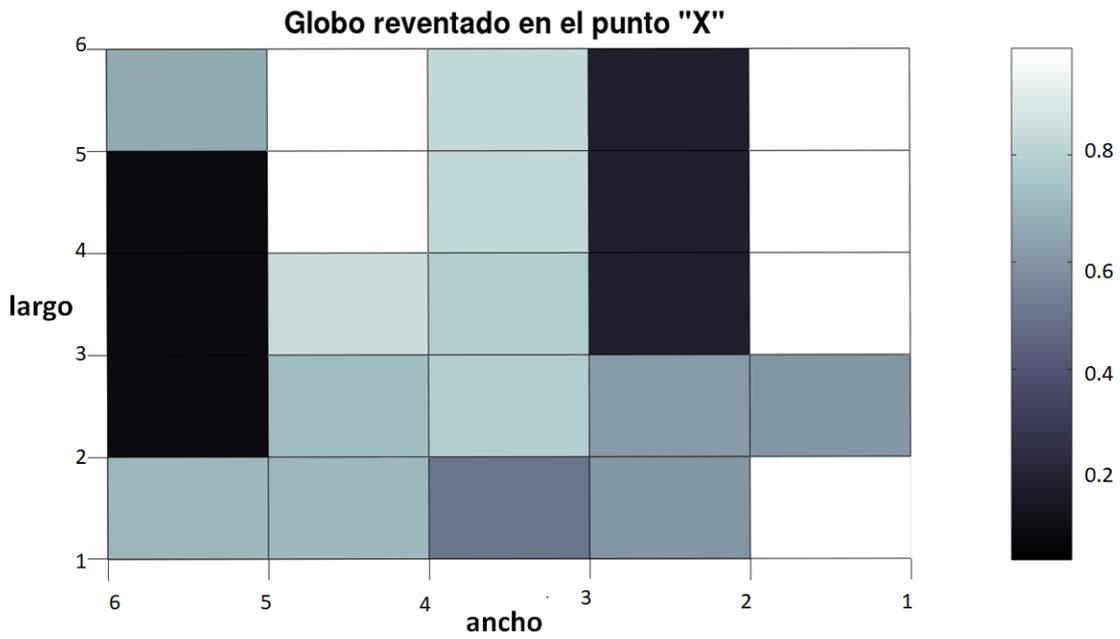


Figura G1. Gráfica de los niveles de intensidad al reventar el globo en el punto X.

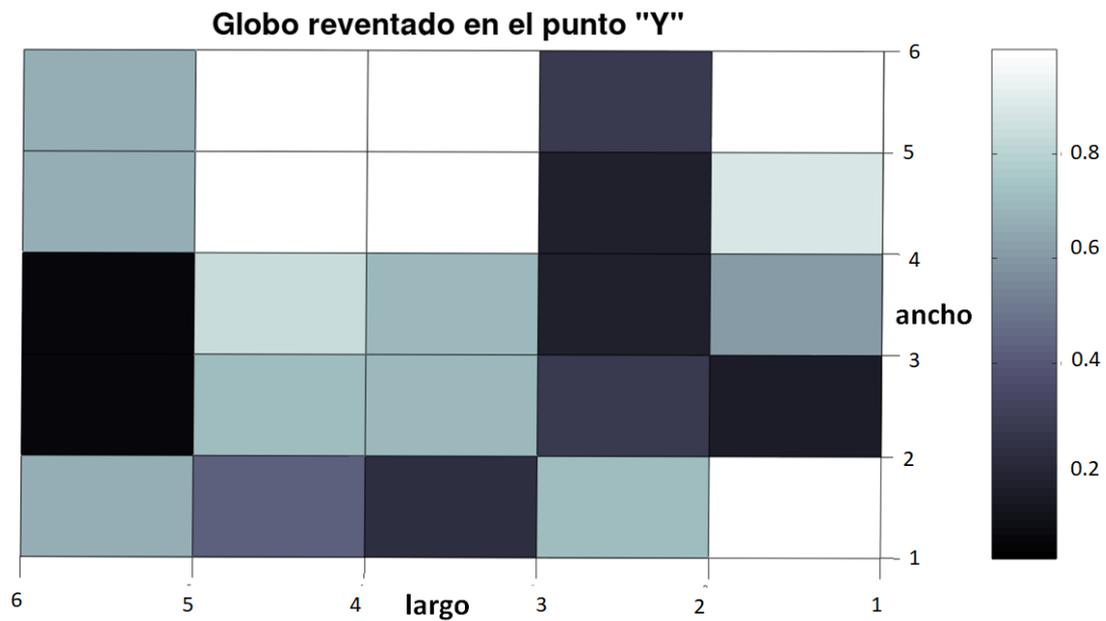


Figura G2. Gráfica de los niveles de intensidad al reventar el globo en el punto Y.

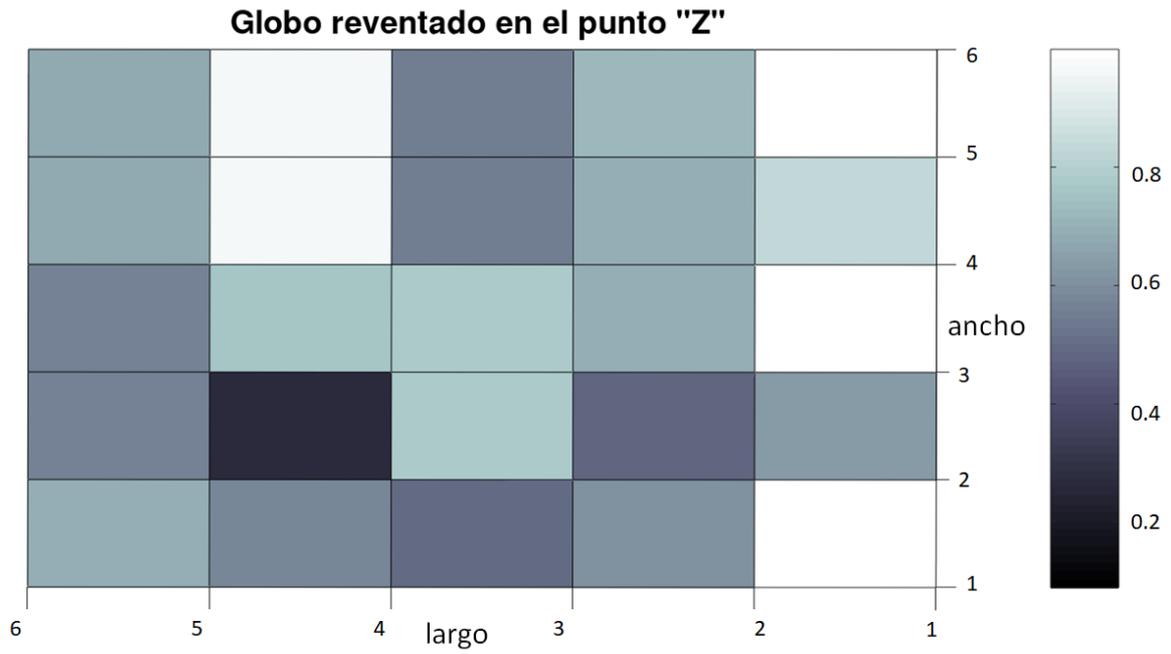


Figura G3. Gráfica de los niveles de intensidad al reventar el globo en el punto Z.

## APÉNDICE H: Esquema de caja mejorada.

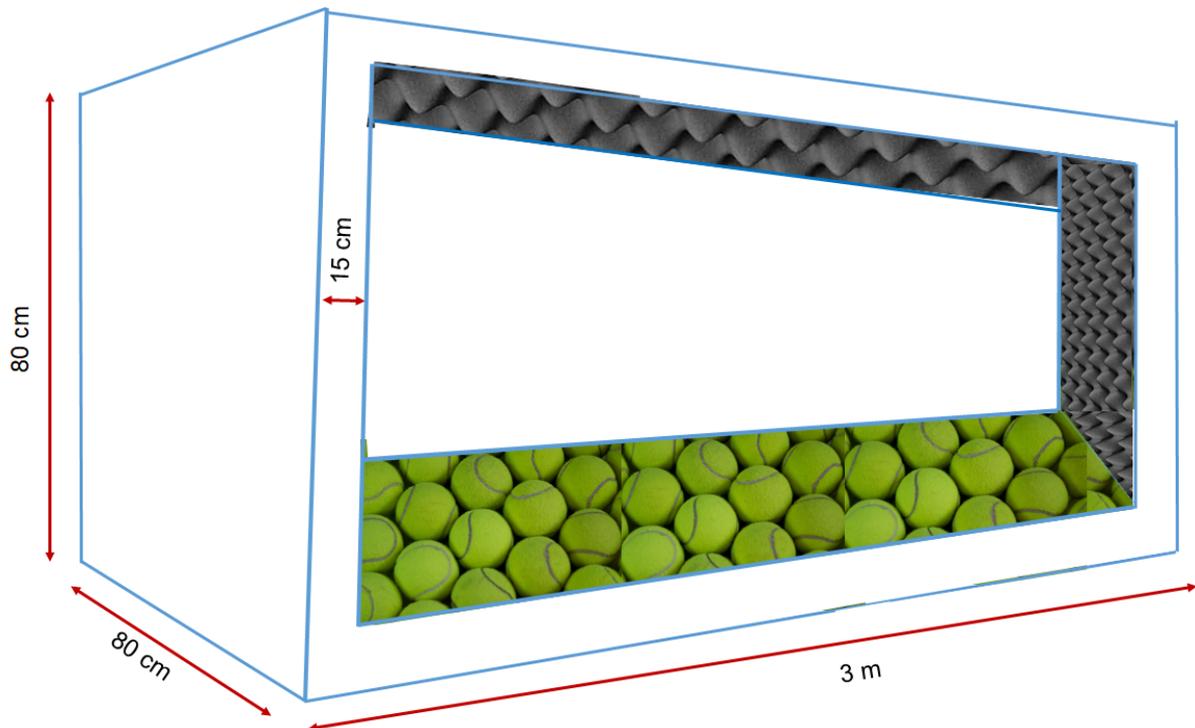


Figura H1. Esquema que muestra las dimensiones de la caja acústica mejorada.

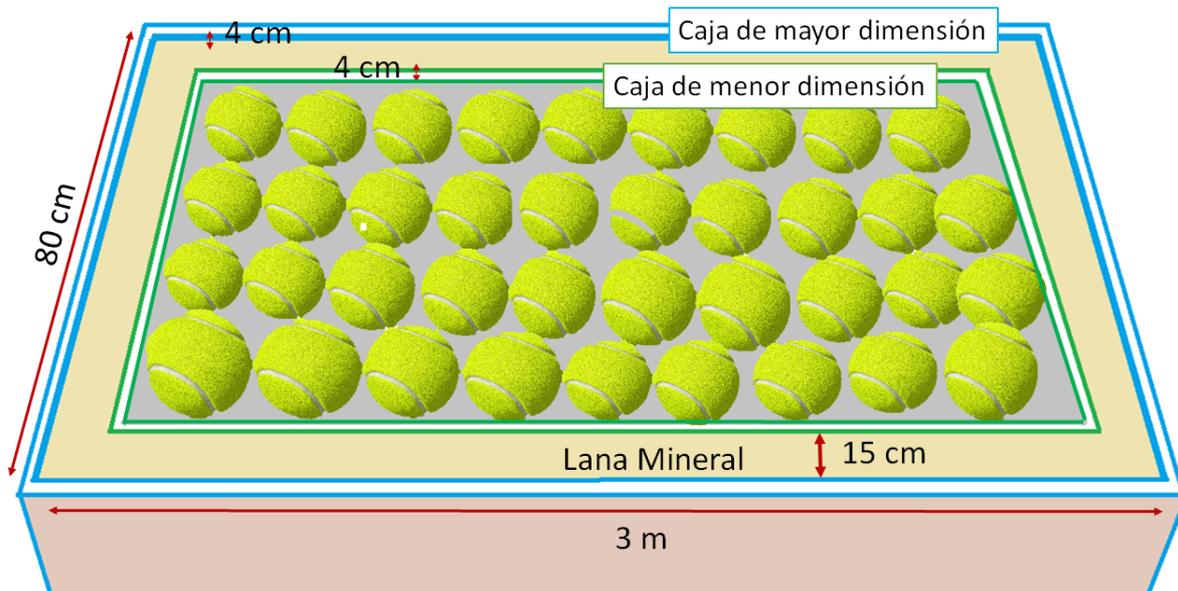


Figura H2. Vista Superior de la caja acústica mejorada.

## APÉNDICE I. Solicitud para llevar a cabo la parte experimental

  
UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MEXICO

 Prevención, Atención y Seguridad Universitaria  
**DGAPSU**  
Dirección General de Análisis, Protección  
y Seguridad Universitaria

**SPASU/DGAPSU/0547/2019**  
**ASUNTO:** Asesoría de Protección Civil

Facultad de Medicina  
Unidad Forense  
Coordinación

26 JUN. 2019

RECIBIDO

Hora: 2:25 pm

**DRA. ZORAIDA GARCÍA CASTILLO**  
**COORDINADORA DE LA LICENCIATURA**  
**EN CIENCIA FORENSE**  
**FACULTAD DE MEDICINA**  
**PRESENTE**

En atención al oficio FMED/LCF/ZGC/118/06/19, en el que solicita autorización para llevar a cabo la actividad denominada "Detonación controlada de 10 cohetes de feria dentro del campus de Ciudad Universitaria", lo anterior, con la finalidad de completar un trabajo de investigación para una tesis de licenciatura.

Al respecto, me permito informarle que el pasado 20 de junio, el Lic. Felipe Romero Pérez, Director de Operaciones y el que suscribe, nos reunimos con el Dr. Vicente Torres Zúñiga, profesor encargado de la coordinación de la actividad académica previamente descrita, así como con el Lic. Moisés Meneses Romero, Jefe de Unidad Administrativa, acordando que el próximo jueves 27 de junio, se llevará a cabo una visita a las instalaciones de la Unidad Canina de la DGAPSU, con la finalidad de definir la logística a seguir para el desarrollo de la actividad. Así mismo, se determinó que la práctica se llevará a cabo el próximo martes 2 de julio, a las 11:00 h, en el lugar previamente referido.

Sin otro particular aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**  
**"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"**  
Ciudad Universitaria, Cd.Mx., 25 de junio de 2019.

**EL DIRECTOR DE PROTECCIÓN CIVIL**

  
**RAÚL FLORES MENDOZA** 26552

  
UNAM  
La Universidad  
de la Nación

C.c.p.- Mtro. Gerardo Moisés Loyo Martínez.- Director General de Análisis, Protección y Seguridad Universitaria.- Presente  
Lic. José Felipe Romero Pérez.- Director de Operaciones de la DGAPSU.- Presente

Figura 11. Solicitud de autorización para realizar la parte experimental en las instalaciones de la DGAPSU.

## APÉNDICE J. Resultados de las mediciones en campo abierto

#	Características del dispositivo	Posición /Ubicación (Coordenadas GPS)		Posición/Ubicación (UTM) Sistema de Mercator	
		Latitud (°)	Longitud(°)	X (m.)	Y(m.)
-	Cohete	19.3122706	-99.1758838	481513.157	2135410.215
1	Motorola Moto E4 Plus	19.312661	-99.175866	481524.945	2135432.665
2	Motorola G-XT1063	19.312652	-99.175961	484514.965	2135431.68
3	Samsung J5 Prime	19.312589	-99.1761024	481500.103	2135424.724
4	Motorola Moto E5	19.312569	-99.176294	481487.81	2135422.567
5	Motorola Moto G5 Plus	19.3125130	-99.1763330	481475.869	2135416.339
6	Huawei P9 lite	19.312417	-99.176315	481477.75	2135405.714
7	Motorola Moto C Plus	19.312336	-99.176294	481479.905	2135396.76

Tabla J1.Registro de la ubicación GPS y UTM de los dispositivos móviles.

<b>Detonación</b>	<b>Hora</b>	<b>Temperatura °C</b>
1	11:39	20.94
2	11:41	20.51
3	11:42	20.36
<b>4</b>	<b>11:44</b>	<b>20.12</b>
5	11:46	20.12
6	11:47	20.12
7	12:05	18.47
8	12:07	18.32
9	12:11	17.62
10	12:13	17.21
11	12:17	16.56
12	12:08	16.54

Tabla J2. Registro de temperatura para cada uno de las detonaciones. Resaltado en color gris, se muestra la temperatura que se empleó para efectuar los cálculos.

<b>Etiqueta</b>	<b>Distancia respecto a la fuente de sonido (m.)</b>	<b>Tiempo de aplauso (s.)</b>	<b>Tiempo de ignición (s.)</b>
Cono 1	43.2383393	3.077414966	106.45678
Cono 2	42.9749347	6.357142857	109.7656236
Cono 3	42.0553691	8.838185941	112.1601134
Cono 4	48.3328759	2.163605442	105.5806576
Cono 5	54.2802493	13.7280625	117.1903125
Cono 6	48.1077909	13.7661875	117.193
Cono 7	43.7389622	10.41058957	113.8094104

Tabla J3. Valores distancia del sensor respecto a la fuente de sonido y sus tiempos de arribo.

#	Sensores	Distancias (m.)	Dif. Tiempos de Arribo (s.)	Ángulo Radianes	Ángulo Grados
1	(1,2)	10.0284907	0.02911565	0.09198031	5.27007131
2	(1,3)	26.080346	0.05743764	0.71459656	40.9432715
3	(1,4)	38.4834748	0.03768707	1.22825418	70.3736162
4	(1,5)	51.7203253	0.08288492	0.98885499	56.6570847
5	(1,6)	54.3481778	0.04744742	1.26669991	72.5763888
6	(1,7)	57.6000922	0.01945578	1.45468591	83.3471682
7	(2,3)	16.4092955	0.08655329	0.98512319	56.443269
8	(2,4)	28.6433377	0.00857143	1.46797944	84.1088299
9	(2,5)	41.9981368	0.05376927	1.11618826	63.9527268
10	(2,6)	45.378292	0.01833177	1.43179299	82.0355037
11	(2,7)	49.4834316	0.00965986	1.50379157	86.1607089
12	(3,4)	12.4808052	0.09512472	1.17824965	67.5085743
13	(3,5)	25.6436148	0.14032256	1.00886417	57.8035237
14	(3,6)	29.343427	0.10488506	0.61686674	35.343778
15	(3,7)	34.4955722	0.07689342	0.70048252	40.1345979
16	(4,5)	13.4675709	0.04519785	0.51809403	29.6845319
17	(4,6)	19.6272058	0.00976035	1.39939878	80.1794566
18	(4,7)	26.990559	0.01823129	1.33699945	76.6042466
19	(5,6)	10.7902171	0.0354375	0.47833105	27.4062864
20	(5,7)	19.9906612	0.06342914	0.40550961	23.2339349
21	(6,7)	9.20967649	0.02799164	0.28634437	16.4062854

Tabla J4. Resultados de la distancia entre sensores, diferencia en tiempos de arribo y el ángulo en radianes-grados que indican la direccionalidad posible de la fuente de sonido.

## APÉNDICE K: Modelo de hipérbolas (Campo cercano) [68]

Las señales recibidas son:

$$y_i = a_i s(t - \tau) + e(t), i = 1, 2, \dots, (n) \quad (1.1)$$

donde el receptor  $i$  se localiza en las coordenadas  $(x_i, y_i)$  y el transmisor en las  $(x, y)$ , son desconocidas.

Con la referencia conocida  $s(t)$  y perfecta sincronización, podemos estimar el tiempo de arribo  $\tau$  y estimar  $(x, y)$  usando un contexto de mínimos cuadrados no-lineal, similar al GPS.

Sin referencia, la idea es comparar las señales por pares. Asumiendo una función de correlación que los pares en la función

$$\Delta D_{i,j} = v (\tau_i - \tau_j), 1 < i < j < n \quad (1.2)$$

donde  $v$  es la velocidad del sonido. Aquí,  $n$  es el número de receptores y  $(i,j)$  es un enumeración para todos los  $K$  pares de receptores, donde

$$K = \binom{n}{2} = \frac{(n-1)}{2} \quad (1.3)$$

Cada  $\Delta d_{i,j}$  corresponde a las posiciones  $(x, y)$  a lo largo de una hipérbola.

Asumiendo primero que los receptores se localizan ambos sobre el eje-X: en:  $x_i = D/2, x_j = -D/2$ , respectivamente. La función hiperbólica puede expresarse como

$$d_2 = \sqrt{y^2 + (x + D/2)^2}, \quad (1.4)$$

$$d_1 = \sqrt{y^2 + (x - D/2)^2}, \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta d &= d_2 - d_1 = h(x, y, D) \\ &= \sqrt{y^2 + (x + D/2)^2} - \sqrt{y^2 + (x - D/2)^2}. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Simplificando, la ecuación se puede reescribir en una forma más compacta como

$$\frac{x^2}{a} - \frac{y^2}{b} = \frac{x^2}{\Delta d^2/4} - \frac{y^2}{D^2/4 - \Delta d^2/4} = 1. \quad (1.7)$$

Para la posición general de un receptor, simplificamos trasladando la función hiperbólica de las coordenadas  $(x, y)$  a las coordenadas globales

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (1.8)$$

donde  $X_0 = (X_i + X_j)/2$ ,  $Y_0 = (Y_i + Y_j)/2$ , localiza el centro del par de puntos. La función en coordenadas globales es entonces dada por  $\Delta d_{i,j} = h(x, y, D)$  en 1. 7 con

$$d_2 = \sqrt{(Y_i + Y_j)^2 + (X_i + X_j)^2} \quad (1.9)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_i - Y_j}{X_i - X_j}\right) \quad (2.2)$$

Así tenemos una forma funcional para trabajar

# REFERENCIAS

1. Código Penal Federal. 2018;
2. Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos. 2015;
3. UNODC. Global study on homicide 2013: Trends, contexts, data. United Nations Office on Drugs and Crime; 2014. doi:10.18356/c1241a80-en
4. SESNSP. Incidencia Delictiva del Fuero Común 2015 [Internet]. México: Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública; 2017 Nov. Available: [http://www.secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2015\\_102017.pdf](http://www.secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2015_102017.pdf)
5. SESNSP. Incidencia Delictiva del Fuero Común 2016 [Internet]. Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública; 2017 Dec. Available: [http://www.secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2016\\_112017.pdf](http://www.secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2016_112017.pdf)
6. SESNSP. Incidencia Delictiva del Fuero Común 2017 [Internet]. Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública; 2018 Aug. Available: [http://secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2017\\_072018.pdf](http://secretariadoejecutivo.gob.mx/docs/pdfs/estadisticas%20del%20fuero%20comun/Cieisp2017_072018.pdf)
7. Vélez Salas D del M, Vélez Salas MA, Rodríguez Chávez JJ, Rodríguez Chávez O, Díaz Sosa CE. Incidencia de los delitos de alto impacto en México 2016. Observatorio Nacional Ciudadano de Seguridad, Justicia y Legalidad; 2017 Jun.
8. Corzo Tellez JA, Serrano Galvez A. Reporte de Incidencia Delictiva en la CDMX. Segundo trimestre de 2018. Ciudad de México: Observatorio Ciudadano de la Ciudad de México; 2018 Aug.
9. History.com Editors. Washington, D.C., sniper John Muhammad convicted . In: HISTORY [Internet]. 13 Nov 2009 [cited 9 Jan 2019]. Available: <https://www.history.com/this-day-in-history/washington-d-c-sniper-john-muhammad-convicted>
10. Mooney MJ. The Legend of Chris Kyle. D Magazine. Apr 2013. Available: <https://www.dmagazine.com/publications/d-magazine/2013/april/the-legend-of-chris-kyle-01/>. Accessed 9 Jan 2019.
11. Hernández E, Ahedo A. Disparo en el Metro provoca caos. El Universal. 22 Dec 2017. Available: <http://www.eluniversal.com.mx/metropoli/cdmx/disparo-en-el-metro-provoca-caos>. Accessed 8 Jan 2019.
12. Cruz Montoy F. “Bala perdida” mató al menor, el disparo se hizo desde la calle. Excelsior. 14 Nov 2012. Available: <https://www.excelsior.com.mx/2012/11/14/comunidad/869590>. Accessed 9 Jan 2019.
13. Escobar A. Una bala perdida le quitó la visión de un ojo. El Universal. 10 Jan 2018.

Available:

<https://www.eluniversal.com.mx/estados/estefania-dormia-cuando-una-bala-perdida-de-los-festejos-de-ano-nuevo-la-impacto>. Accessed 9 Jan 2019.

14. Mungarro Menchaca XF. La importancia del lugar de los hechos y el tratamiento de los indicios. In: García Castillo Z, Álvarez Cárdenas A, Villavicencio Queijeiro A, editors. *Ciencia Forense en el contexto del Nuevo Sistema de Justicia Penal*. 2da ed. México: Tribunal Superior de Justicia de la Ciudad de México.; 2018. pp. 102–115.
15. Vidrio OC. *Balística: técnica y forense*. Ediciones La Rocca; 2007.
16. OEA :: SAJ :: Departamento de Derecho Internacional :: Tratados Multilaterales Interamericanos [Internet]. [cited 4 Jan 2019]. Available: [http://www.oas.org/es/sla/ddi/tratados\\_multilaterales\\_interamericanos\\_A-63\\_fabricacion\\_trafico\\_ilicito\\_armas\\_municiones\\_explosivos.asp](http://www.oas.org/es/sla/ddi/tratados_multilaterales_interamericanos_A-63_fabricacion_trafico_ilicito_armas_municiones_explosivos.asp)
17. *Compendio de armas de fuego disimuladas 2003*. NCIS; 2003.
18. Maher R. Acoustical Characterization of Gunshots. *IEEE Xplore*; 2007. pp. 1–5.
19. Guida HL, Diniz TH, Kinoshita SK. Acoustic and psychoacoustic analysis of the noise produced by the police force firearms. *Braz J Otorhinolaryngol*. 2011;77: 163–170. doi:10.1590/S1808-86942011000200005
20. Maher RC. *Principles of forensic audio analysis*. Cham: Springer International Publishing; 2018. doi:10.1007/978-3-319-99453-6
21. Aguilar Ruiz MO. Fortalecimiento de los servicios periciales hacia el nuevo modelo de justicia acusatorio / (Ensayo). *Nova Iustitia Revista Digital de la Reforma Penal*. 2014;6: 81–92.
22. Moreno González R. *Balística Forense*. 13 a. Porrúa; 2003.
23. Saferstein R. *Criminalistics: An introduction to forensic science*. 10th ed. Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Education; 2011.
24. Shaler RC. *Crime Scene Forensics: A Scientific Method Approach*. 1st ed. Boca Raton, FL: Crc Press; 2011. p. 644.
25. Gisbert Calabuig JA. Lesiones por arma de fuego y explosiones. In: Villanueva Cañadas E, editor. *Medicina legal y toxicología*. 6ta ed. Barcelona, España: Elsevier-Masson; 2004. pp. 394–408.
26. Alvarado EV. *Medicina Legal*. 6th ed. Editorial Trillas; 2017.
27. Patitó JÁ. *Medicina Legal*. Vicino; 2001.
28. Houck MM, Siegel JA. *Fundamentals of forensic science*. 2da ed. Burlington, MA: Academic Press; 2010.
29. Brožek-Mucha Z. Comparison of cartridge case and airborne GSR—a study of the elemental composition and morphology by means of SEM-EDX. *X-Ray Spectrom*. 2007;36: 398–407. doi:10.1002/xrs.990
30. Zeichner A, Glattstein B. Recent developments in the methods of estimating shooting distance. *ScientificWorldJournal*. 2002;2: 573–585. doi:10.1100/tsw.2002.140

31. Charles S, Nys B, Geusens N. Gunshot Residue, literature review 2013-2015. 2016.
32. Fonseca JF, Cruz MM, Carvalho ML. Muzzle-to-target distance determination by X-ray fluorescence spectrometry. *X-Ray Spectrom.* 2014;43: 49–55. doi:10.1002/xrs.2497
33. Gagliano-Candela R, Colucci AP, Napoli S. Determination of firing distance. Lead analysis on the target by atomic absorption spectroscopy (AAS). *J Forensic Sci.* 2008;53: 321–324. doi:10.1111/j.1556-4029.2008.00668.x
34. Arpak BB, Erkol Z, Buken B, Erzenin ÖU. Estimation of Shooting Distance with Flameless Atomic Absorption Spectrophotometry (FAAS) Method in Experimentally Formed Shooting Residues. *Turkiye Klinikleri J Med Sci.* 2013;33: 762–768. doi:10.5336/medsci.2012-31164
35. Capannesi G, Ciavola C, Sedda AF. Determination of firing distance and firing angle by neutron activation analysis in a case involving gunshot wounds. *Forensic Sci Int.* 1993;61: 75–84. doi:10.1016/0379-0738(93)90216-W
36. Neri M, Turillazzi E, Riezzo I, Fineschi V. The determination of firing distance applying a microscopic quantitative method and confocal laser scanning microscopy for detection of gunshot residue particles. *Int J Legal Med.* 2007;121: 287–292. doi:10.1007/s00414-006-0110-1
37. <http://www.bellcommspain.com/Documentos/Proteccion/Boomerang.pdf> [Internet]. [cited 3 Sep 2018]. Available: <http://www.bellcommspain.com/Documentos/Proteccion/Boomerang.pdf>
38. Snedden R. *Portable Power. Robotics in the Military.* 1st ed. New York: Lucent Books; 2018. p. 17.
39. Home - ShotSpotter [Internet]. [cited 3 Sep 2018]. Available: <https://www.shotspotter.com/>
40. Cities Are Using Hidden Webs of Acoustic Sensors to Detect Gunfire - VICE [Internet]. [cited 25 Nov 2019]. Available: [https://www.vice.com/en\\_us/article/xywgva/cities-are-using-hidden-webs-of-acoustic-sensors-to-detect-gunfire](https://www.vice.com/en_us/article/xywgva/cities-are-using-hidden-webs-of-acoustic-sensors-to-detect-gunfire)
41. Pregliasco RG. *Ciencia Hoy.* El sonido de una hoja Estudio acústico de un homicidio. 23 Jul 200111: 12–23.
42. Serway RA, Jewett JW. *Física para ciencias e ingeniería.* 9na ed. Mexico: Cengage Learning; 2015.
43. Young HD, Freedman RA. *Física Universitaria.* 13 ra. Naucalpan de Juárez, Estado de México: Pearson; 2013.
44. Transnational College of Lex. *Aventuras con Fourier.* Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial, editor. México, D.F: UNAM; 2008.
45. Stark H. Theory and measurement of the optical fourier transform. Application of optical fourier transforms. Elsevier; 1982. pp. 1–40. doi:10.1016/B978-0-12-663220-0.50008-5
46. Gupta A. Fourier Transform and Its Application in Cell Phones. *IJSRP.* 2013;3.

47. Hande K, Vanu F. Applications of Fourier series in communication system. IJSER. 2015;6: 24–25.
48. Armaselu A. New spectral applications of the fourier transforms in medicine, biological and biomedical fields. In: Nikolic GS, Cakic MD, Cvetkovic DJ, editors. Fourier Transforms - High-tech Application and Current Trends. InTech; 2017. doi:10.5772/66577
49. Sokołowski A, Pardela T. Application of fourier transforms in classification of medical images. In: Hippe ZS, Kulikowski JL, Mroczek T, Wtorek J, editors. Human-Computer Systems Interaction: Backgrounds and Applications 3. Cham: Springer International Publishing; 2014. pp. 193–200. doi:10.1007/978-3-319-08491-6\_16
50. Tippens PE. Capítulo 22. Sonido. Física, Conceptos Y Aplicaciones . 7ma ed. Javier Neyra Bravo; 2011. p. 441.
51. Wolfgang B. 16. Sonido. Física para Ingeniería y ciencias con física moderna. 2018. p. 555.
52. Krause PF, Flood KL. Weather and Climate Extremes, US Army Corps of Engineers Topographic Engineering Centerpp. US Army Corps of Engineers Topographic Engineering Centerpp; 1997 Sep.
53. El Fadli KI, Cerveny RS, Burt CC, Eden P, Parker D, Brunet M, et al. World meteorological organization assessment of the purported world record 58°C temperature extreme at el azizia, libya (13 september 1922). Bull Amer Meteor Soc. 2013;94: 199–204. doi:10.1175/BAMS-D-12-00093.1
54. CONAGUA Clima. Récor ds de temperatura en la CDMX. Twitter. 2018.
55. CONAGUA Clima. Temperaturas mínimas históricas por entidad en la República Mexicana diciembre. In: Twitter [Internet]. 11 Dec 2017 [cited 7 Nov 2018]. Available: <https://twitter.com/search?q=Conoce%20a%20trav%C3%A9s%20del%20%23SMNmx%20las%20%23Temperaturas%20m%C3%ADnimas%20hist%C3%B3ricas%20que%20se%20han%20registrado%20para%20un%20mes%20de%20diciembre%20por%20entidad%20en%20%23M%C3%A9xico&src=typd>
56. Akman Ç. Multi Shooter Localization with Acoustic Sensors. Master thesis. 2017.
57. Settles G, Grumstrup T, Miller J, Hargather M, Dodson L, Gatto J. Full-scale high-speed “Edgerton” retroreflective shadowgraphy of explosions and gunshots. ResearchGate; 2005.
58. audio - How to calculate an azimuth of a sound source in stereo signal - Signal Processing Stack Exchange [Internet]. [cited 29 Nov 2019]. Available: <https://dsp.stackexchange.com/questions/30736/how-to-calculate-an-azimuth-of-a-sound-source-in-stereo-signal?rq=1>
59. De Silva CW. Sensor Systems: Fundamentals And Applications. 1st ed. Boca Raton: Crc Press; 2016. p. 746.
60. Swokowski. Precálculo. Algebra y Trigonometría con Geometría Analítica. Cengage Learning; 2018.

61. Teorema de Apolonio – GeoGebra [Internet]. [cited 23 Oct 2019]. Available: <https://www.geogebra.org/m/b5hp8b6G>
62. Sammons J. The Basics of Digital Forensics: The Primer for Getting Started in Digital Forensics. Amsterdam: Elsevier Science; 2012. p. 208.
63. Rajiv Netra. How GPS, Cell Tower and Wi-Fi triangulation help in tracking location? In: Safetrax [Internet]. 5 Sep 2017 [cited 19 Mar 2019]. Available: <https://www.safetrax.in/tag/wifi-triangulation/>
64. Ayers R, Brothers S, Jansen W. Guidelines on mobile device forensics. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology; 2014 May. doi:10.6028/NIST.SP.800-101r1
65. Cuenta la UNAM con Laboratorio de Acústica y Vibraciones de vanguardia en América Latina [Internet]. [cited 28 Mar 2019]. Available: [http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015\\_738.html](http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_738.html)
66. ICAT [Internet]. [cited 28 Mar 2019]. Available: <http://www.icat.unam.mx/secciones/depar/sub2/acusvi/acust.html>
67. Red Universitaria de Observatorios Atmosféricos [Internet]. [cited 26 Aug 2019]. Available: <https://www.ruoa.unam.mx/index.php?page=estaciones&id=1>
68. Gustafsson F, Gunnarsson F. Positioning using time-difference of arrival measurements. 2003 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2003 Proceedings (ICASSP '03). IEEE; 2003. pp. VI-553–6. doi:10.1109/ICASSP.2003.1201741