



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**FACULTAD DE MEDICINA
LICENCIATURA EN CIENCIA FORENSE**



**COTAS DE MÁXIMA PENETRACIÓN DE
PROYECTILES CALIBRE 9mm AL
IMPACTAR MANIQUÍES BIOLÓGICOS
PLÁSTICOS**

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

**PRESENTA:
VANESSA FOSSATI DEL ÁNGEL**



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. VICENTE TORRES ZÚÑIGA
2022**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Gracias al Dr. José Ocotlán Flores por su ayuda en la elaboración de los geles balísticos; al M. en C. José Guadalupe Bañuelos Muñetón por su apoyo durante las actividades desarrolladas en el stand de tiro; al Mtro. Sergio Salazar Soto por su ayuda para contactar al personal de SEDENA y el stand de tiro. Gracias al Capitán 2/o. de Caballería, Arturo Gorostiza Zatarain por realizar los disparos con el arma de fuego y al personal de la fábrica Mendoza Shooting Sports S.A.P.I. de C.V. por permitirnos utilizar sus instalaciones.

A los Sinodales:

- Dra. Karla Paola García Pelagio
- Mtro. Roberto Carlos Hernández Corona
- Dra. Alejandra Mercado Salomón
- Mtro. Sergio Salazar Soto

A mi asesor de tesis, el Dr. Vicente Torres Zúñiga, por su acompañamiento en este camino.

Gracias a mi familia por su apoyo incondicional y por mi educación.

Gracias a Alan por su infinita paciencia y comprensión durante este proceso.

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

RESUMEN DE LA OBRA

Esta tesis de licenciatura presenta un modelo físico matemático del comportamiento de un proyectil penetrando un medio plástico. El modelo pretende determinar la distancia máxima que puede alcanzar una bala al pasar a través de un maniquí en función de la velocidad inicial del proyectil. El maniquí consiste en bloques de gel balístico (elaborados de forma casera) y su intención es simular tejido homogéneo, blando y humano.

Mediante videocámaras rápidas se obtuvieron un total de siete videos que muestran el desplazamiento individual de cada proyectil viajando en agua (tres videos públicos) o gel balístico (cuatro videos de mi autoría). Las armas utilizadas y los calibres fueron diferentes excepto en dos videos donde se mantuvo constante el uso de gel balístico y la utilización de balas 9 mm. Mediante el análisis de las imágenes se registró el movimiento de cada proyectil como datos de posición en función del tiempo. Posteriormente, las variables se transformaron en datos de distancia recorrida en función de la velocidad, mismos que se compararon con el modelo teórico propuesto en este trabajo.

Los resultados empíricos son coherentes con el modelo teórico, por lo que se puede extrapolar la información para guiar las pesquisas en casos reales donde una bala viajó únicamente entre tejido blando. Entonces, al conocer la distancia neta del trayecto, se obtiene la velocidad del proyectil al instante en que impacta el cuerpo humano. Tal valor puede ser de interés en el quehacer forense para el avance de pesquisas o el complemento de periciales como son la reconstrucción de hechos mecánicos.

OBJETIVOS

- 1) Proponer un modelo teórico que permita calcular la máxima penetración en función de la velocidad de impacto, cuando la bala viaja exclusivamente a través de tejidos blandos, específicamente, piel, músculo estriado esquelético y liso.
- 2) Obtener videos de alta velocidad de proyectiles cuyo paso ocurre a través de medios resistivos (como el agua) y plásticos simuladores de tejido blando humano (como puede ser gel balístico).
- 3) Comparar la tendencia de datos empíricos con el modelo teórico, obteniendo valores de incertidumbre para establecer el alcance de la propuesta en su aplicación forense; en particular, su problema inverso: determinar la velocidad de impacto conociendo la distancia máxima de un trayecto consistente sólo de material blando.

PUNTOS A DESTACAR

- 1) El modelo propuesto que describe la velocidad de impacto en función de "la cota máxima de penetración en tejido blando humano" es poco conocido en el quehacer forense, motivo por el que se considera que es un aporte al área que permitirá realizar una investigación forense más integral.
- 2) Para el desarrollo de esta tesis, se implementaron métodos y técnicas novedosas, al menos reportadas hasta la fecha para la Licenciatura en Ciencia Forense, tales como la elaboración de geles balísticos, la videograbación mediante cámara rápida y la visualización anatómica del trayecto en un medio digital (*e.i. Anatomage table*), por mencionar las más relevantes.
- 3) Se obtuvieron resultados empíricos con amplia variabilidad experimental. Se analizaron tres vídeos de dominio público y cuatro más que fueron grabados, de los cuales, dos de ellos corresponden a disparos con un arma Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm. Se utilizaron dos medios resistivos: agua y gel balístico. En cuanto a las armas, se estudiaron los efectos de un revólver, dos pistolas (Ruger y Glock® modelo 17, ambas 9 mm), un rifle de aire y un rifle de asalto.

PALABRAS CLAVE

1) Balística de efectos 2) Tejidos blandos 3) Gel balístico 4) Cámara ultra rápida 5) Relación entre el trayecto (de material plástico) y la velocidad del proyectil.

ESTRUCTURA DE LA OBRA

Esta obra cuenta con 5 capítulos:

En el primer capítulo se presenta una introducción sobre los fundamentos de la balística. Se destacan conceptos y definiciones generales de dicha especialidad, así como las diversas clasificaciones de armas y las principales características de los cartuchos y los calibres, aterrizando la información al calibre utilizado para este trabajo. Se aborda también el tema de la balística de heridas, en donde se expondrán aspectos morfológicos que el proyectil y la pólvora causan sobre la piel, mencionando la creación de la cavidad temporal y el canal de una herida. Se presentan imágenes obtenidas de modelos anatómicos mediante la herramienta “*Anatome-Table*”. Hasta nuestro conocimiento, es la primera vez que se utiliza este dispositivo en el país para una tesis de licenciatura en ciencia forense.

Se continúa con el tema de los polígonos de tiro, en donde se dan a conocer lineamientos, componentes necesarios para el acondicionamiento del sitio, protocolos de seguridad y precauciones de estos espacios.

Continuando con el segundo capítulo, se presentan modelos de balística terminal; se comparan algunos materiales populares que han sido utilizados como modelos balísticos al simular estructuras biológicas y argumento algunas ventajas y limitantes sobre el uso de geles para realizar pruebas balísticas. Se profundiza acerca del fenómeno de balística terminal, conocido como “penetración” cuando el impacto ocurre en tejidos blandos humanos. Se amplía la información sobre los proyectiles penetrantes y se presentan comparaciones de modelos existentes, concluyendo con la propuesta final del modelo matemático para este trabajo que se centra en la relación entre la distancia máxima de penetración conforme a la velocidad de impacto en un medio plástico.

El tercer capítulo de la obra se centra en la descripción de los materiales e instrumentos que fueron utilizados para los experimentos, siendo estos la cámara de alta velocidad Chronos 1.4, el gel balístico realizado con grenetina y el arma de fuego Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm con sus respectivos cartuchos con los que se efectuaron los disparos. Se detalla la preparación de los geles balísticos y se describen los pasos seguidos tanto para las pruebas preliminares, como para las pruebas con el arma de fuego, de modo que ambas sean consideradas confiables en el ámbito forense por su alto nivel de reproducibilidad.

En el capítulo siguiente, se muestran los resultados que fueron obtenidos de las pruebas preliminares y en el stand de tiro. Se analizan y discuten los datos a través de confrontas y comparaciones que muestran las diferencias de velocidad y penetración entre las armas estudiadas, finalizando con el último capítulo de este trabajo exponiendo las conclusiones y prospectivas científicas que podrían ser desarrolladas a partir de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL	
RESUMEN DE LA OBRA	2
OBJETIVOS	2
PUNTOS A DESTACAR	3
PALABRAS CLAVE	3
ESTRUCTURA DE LA OBRA	4
CAPÍTULO 1.	7
ANTECEDENTES, MOTIVACIONES Y FUNDAMENTOS	7
IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN BALÍSTICA	7
1.1 FUNDAMENTOS DE BALÍSTICA	13
1.1.1 CLASIFICACIÓN DE ARMAS DE FUEGO	13
1.1.2 PISTOLA GLOCK® MODELO 17 CALIBRE 9 x 19 mm	17
1.1.3 CARTUCHOS	18
1.1.4 HUELLAS DEL PERCUTOR	19
1.1.5 CALIBRE	20
1.2 BALÍSTICA DE HERIDAS	23
1.2.1 MORFOLOGÍA DE LAS HERIDAS	23
1.2.2 ORIFICIO DE ENTRADA Y SALIDA	24
1.2.3 EFECTOS DEL PROYECTIL EN LA PIEL	25
1.2.4 EFECTOS DE LA PÓLVORA	28
1.2.5 CANAL DE LAS HERIDAS	29
1.2.6 CAVIDAD TEMPORAL	30
1.3 VISUALIZACIÓN DE HERIDAS MEDIANTE ANATOMAGE-TABLE	31
1.4 POLÍGONOS DE TIRO	37
1.4.1 PRECAUCIONES DENTRO DE UN POLÍGONO DE TIRO	37
1.4.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEGURIDAD	38
1.5 GELES BALÍSTICOS	39
1.5.1 EJEMPLO DEL DESARROLLO DE PRUEBAS MEDIANTE EL USO DE GELES BALÍSTICOS	39
1.6 USO DE LA CÁMARA FOTOGRÁFICA Y DE VIDEO	41
1.6.1 EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAFÍA A TRAVÉS DE LOS AÑOS	41
1.6.2 SISTEMAS DE LAS CÁMARAS DE ALTA VELOCIDAD	43
1.6.3 USO DE LA CÁMARA ULTRA RÁPIDA EN ESTUDIOS BALÍSTICOS	44
CAPÍTULO 2.	47
MODELOS BALÍSTICOS	47
2.1 PENETRACIÓN	47
2.1.1 MECANISMOS DE PENETRACIÓN	47
2.1.2 POTENCIAL DE HERIDA	48
2.1.3 PENETRACIÓN EN LA PIEL Y EN EL CUERPO HUMANO	49
2.2 COMPORTAMIENTO DE UNA BALA PENETRANTE	50

2.2.1 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE PROYECTILES DISPARADOS POR PISTOLA	51
2.2.2 APLICACIÓN DE LA MECÁNICA EN EL ÁMBITO BALÍSTICO	51
2.3 SIMULADORES	54
2.4 MODELOS TEÓRICOS DE BALÍSTICA TERMINAL	58
2.4.1 MODELO DE TAPONAMIENTO Y MODELO DE PÉTALO	58
2.4.2 MODELO DE DESPLAZAMIENTO (FALLA DÚCTIL)	58
2.4.3 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE UNA BALA PENETRANDO TEJIDO BLANDO	59
CAPÍTULO 3.	65
MATERIALES, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO	65
3.1 CÁMARA ULTRA RÁPIDA	65
3.2 GELES BALÍSTICOS	67
3.2.1 CANALETA DE ACRÍLICO	68
3.3 ARMA DE FUEGO Y PROYECTIL	70
3.4 PRUEBAS PRELIMINARES	72
3.4.1 EXPERIMENTO PRELIMINAR DE CONTENEDORES DE PLÁSTICO CON AGUA Y RIFLE DE AIRE	72
3.4.2 EXPERIMENTO PRELIMINAR CON GELES Y RIFLE DE AIRE	74
3.5 EXPERIMENTACIÓN CON GELES Y ARMA DE FUEGO	75
3.5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS PRUEBAS BALÍSTICAS	75
3.5.2 PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL LUGAR	76
3.5.3 DESARROLLO DE LA PRUEBA	77
3.5.4 PROCESO DE VIDEO ANÁLISIS	78
CAPÍTULO 4.	81
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	81
4.1 ANÁLISIS DE PRUEBAS PRELIMINARES	81
4.1.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CONTENEDORES CON AGUA Y RIFLE DE AIRE	81
4.1.2 RESULTADOS DE PRUEBAS CON GELES Y RIFLE DE AIRE	82
4.2. ANÁLISIS DE PRUEBAS CON ARMA DE FUEGO	86
4.2.1 ANÁLISIS DE PROYECTILES	94
CAPÍTULO 5.	96
CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA	96
BIBLIOGRAFÍA	98
APÉNDICE	100
GLOSARIO	100

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES, MOTIVACIONES Y FUNDAMENTOS

Este primer capítulo argumenta sobre la importancia de la investigación balística desde la perspectiva forense. Además, por ser este un trabajo multidisciplinario, se muestran algunos de los fundamentos de la balística: marcos legales, conceptos sobre municiones, armas de fuego, polígonos de tiro y efectos de los proyectiles (en concreto heridas). Más aún, aquí se exponen particulares de técnicas y métodos utilizados regularmente para realizar mediciones que involucran armas de fuego. Finalmente, entre las secciones se presentan particularidades del caso motivador de este trabajo de investigación académico.

IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN BALÍSTICA

A pesar de que nos encontramos en una época altamente globalizada, cada país sigue contando con sus propias leyes y reglamentos encaminados a salvaguardar la vida y la integridad de sus habitantes de acuerdo a factores y necesidades sociales y geográficas, entre otras particularidades. Las leyes que involucran armas de fuego no son la excepción en estos casos; cada país, incluso, cada ciudad, cuenta con sus propias normas. Sin embargo, todos los reglamentos que integren aspectos relacionados con el ámbito balístico deben apegarse a los siguientes aspectos fundamentales:

- **Objetos:** determinación de si un arma de fuego requiere de algún registro oficial o bien, si se trata de un arma que se considera como “prohibida” por alguna ley.
- **Sujetos:** debe conocerse si es necesario contar con algún permiso para adquirir un arma y cuáles son los requisitos que deben cumplirse para obtener dicha licencia.
- **Actividades:** existen normas que determinan de manera específica en qué tipo de actividades está permitido utilizar armas de fuego.
- **Mecanismo de cumplimiento:** esta acción tiene como finalidad proteger el derecho de los ciudadanos a través del cumplimiento de las leyes por parte de las autoridades.

Por otro lado, el uso indebido de armas de fuego en México es un problema que ha incrementado considerablemente en los últimos años. Basándonos en información publicada y regularmente actualizada por el Índice de Paz en México, “entre los años 2015 y 2020, la tasa de delitos cometidos con arma de fuego ha aumentado en un 84%”. [1]. Este acelerado incremento, representa un área de oportunidad para la modificación y especificación de leyes que fomentarían la disminución de los índices de violencia.

El artículo 9° de la *Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos* [2] menciona que pueden poseerse o portarse, en los términos y con las limitaciones establecidas por esta ley, armas de las características siguientes:

I.- Pistolas de funcionamiento semi-automático de calibre no superior al .380 (9 mm), exceptuando las pistolas calibres .38 Super y .38 Comando, y también en calibres 9 mm de Mausser, Luger, Parabellum y Comando, así como los modelos similares de otras marcas.

II.- Revólveres en calibres no superiores al .38 Especial, excepto el calibre .357 Magnum.

También existe un sustento en el artículo 10° de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, en donde menciona que:

Los habitantes de los Estados Unidos Mexicanos tienen derecho a poseer armas en su domicilio, para su seguridad y legítima defensa, con excepción de las prohibidas por la Ley Federal y de las reservadas para el uso exclusivo de la Fuerza Armada permanente y los cuerpos de reserva. La ley Federal determinará los casos, condiciones, requisitos y lugares en que se podrá autorar a los habitantes la portación de armas. [3]

De acuerdo con datos del Informe de Seguridad del gobierno de México, “*en el año 2021, el modo de homicidios dolosos que predominó en México fue a través del uso de armas de fuego, mientras que el empleo de instrumentos como armas blancas u otro tipo de violencia física, también se vió reflejado en este resultado, pero en menor medida*”[4] como se muestra en la figura 1.

Para este trabajo, el objeto de estudio principal son las armas cortas calibre 9 mm. Si bien con este tipo de arma ya se han realizado investigaciones de balística interna, externa y de efectos, es todavía insuficiente la información sobre la mecánica de los efectos de estas armas cortas. Además, cabe mencionar que existe información confidencial que, por motivos de seguridad, no es posible revelar la fuente en este trabajo, muestra que las pistolas Glock® calibre 9 mm ocupan el segundo lugar de popularidad de armas aseguradas durante la administración del presidente en curso de nuestro país.

HOMICIDIOS 2021 SEGÚN EL TIPO DE LESIÓN

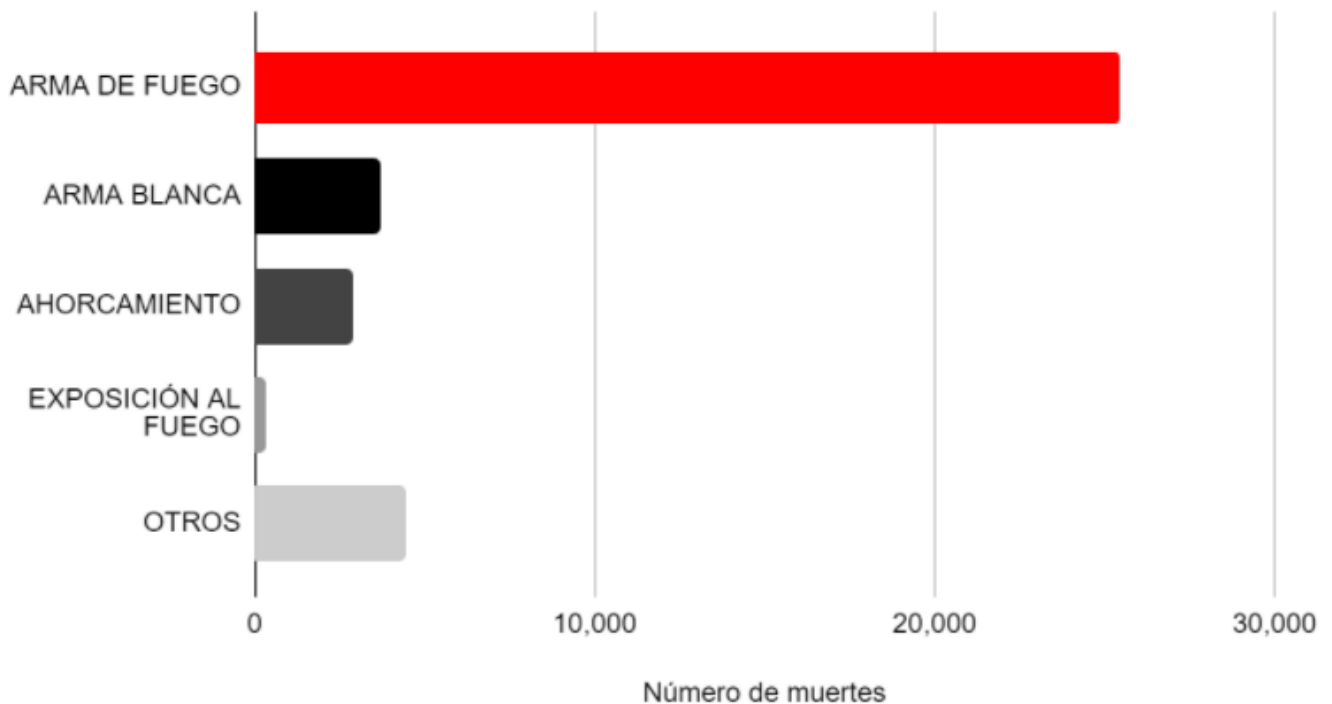


Figura 1. Gráfica de frecuencia de homicidios en el año 2021 según el tipo de lesión [4]

Esta área de oportunidad ha despertado interés en la comunidad forense en casos especiales, pues a pesar de tratarse de un arma corta, no es precisamente la más común para cometer delitos por el hecho de asociarse al uso exclusivo del fuerzas policiacas y del Ejército, Armada y Fuerza Aérea, como lo menciona el artículo 11° de la *Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos* en su apartado B [2]. Esta característica torna los casos sumamente controversiales y de interés público. Tal como lo fue el caso ocurrido en el mes de mayo del 2019 en el centro de Cuernavaca, donde un joven de 22 años cometió el delito de homicidio en contra de dos trabajadores de la Confederación de Trabajadores de México. En este incidente dos civiles fueron lesionados por las balas provenientes de una Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm; arma que, anteriormente, pertenecía a un elemento de la Secretaría de Seguridad Ciudadana de Cuernavaca hasta octubre de 2017, fecha en que el agente que portaba el arma participó en un intento de asalto [5].

Durante las investigaciones de la tentativa de asalto de 2017, el arma antes mencionada fue puesta a disposición del Ministerio Público para su análisis correspondiente, pero una deficiente cadena de custodia provocó el extravío de algunos indicios relacionados al caso, incluyendo esta arma. Un año y medio más tarde se localizó nuevamente el arma en el incidente antes mencionado en la ciudad de Cuernavaca, por lo que existen múltiples interrogantes sobre cómo fue que el arma desapareció de la Fiscalía y llegó a las manos de un joven que, en calidad de civil, puso fin a la vida de dos personas.

Esta noticia no resulta del todo sorprendente si analizamos información compartida por la *Agencia del Control del Alcohol, Tabaco, Armas de Fuego y Explosivos* (ATF) en donde se afirma que “*No todas las armas de fuego utilizadas en la delincuencia son rastreadas y no todas las armas de fuego rastreadas se utilizan en la delincuencia*”[6]. Por ejemplo, a continuación se muestra información que representa el número y el tipo de armas de fuego que fueron recuperadas en México durante los años 2015 y 2020 y, posteriormente, presentadas a la ATF para su debido rastreo. El rastreo de armas de fuego es el seguimiento sistemático del movimiento de un arma desde su primera venta por un fabricante o importador a través de la cadena de distribución con el objetivo de proporcionar indicios y líneas de investigación durante un proceso de recopilación de información de un caso.

Types of Firearms Recovered in Mexico and Submitted to ATF for Tracing

CALENDAR YEARS 2015 - 2020

Calendar Year	CY 2015		CY 2016		CY 2017		CY 2018		CY 2019		CY 2020	
	# of Traces	% of All Traces	# of Traces	% of All Traces	# of Traces	% of All Traces	# of Traces	% of All Traces	# of Traces	% of All Traces	# of Traces	% of All Traces
Category – Types of Firearms												
Pistols	8,395	46.5	7,145	50.8	7,780	48.9	8,725	51.3	10,261	51.8	9,796	49.6
Revolvers	2,456	13.6	2,087	14.8	2,192	13.8	2,311	13.6	2,678	13.5	2,318	11.7
Rifles	5,685	31.5	3,799	27.0	4,832	30.4	4,640	27.3	5,352	27.0	6,049	30.6
Shotguns	1,029	5.7	757	5.4	789	5.0	909	5.3	1,030	5.2	1,097	5.6
Other	479	2.7	283	2.0	301	1.9	421	2.5	469	2.4	502	2.5
<u>Total</u>	18,044		14,071		15,894		17,006		19,790		19,762	

Figura 2. Tipos de armas de fuego recuperadas en México y presentadas a la ATF para su rastreo entre el año 2015 y el año 2020 [6].

En la figura 2 puede verse que las pistolas son el tipo de arma que encabeza esta lista, continuando con el revólver y el rifle. Se aprecia claramente que en este lapso, las pistolas representan en promedio el 49% del total de armas recuperadas, siendo el año 2019 en el que el mayor número de pistolas fueron rastreadas (10,261 de un total de 19,790).

Ahora bien, existe otro caso ocurrido a finales del mes de abril del 2019, importante de mencionar debido a que representa el motivador principal de esta tesis. Fue un evento que representó un tema de discusión entre peritos de diversas materias debido a que una joven perdió la vida en el interior de una instalación escolar a causa de un proyectil de arma de fuego, del que, hasta la fecha, se desconoce su procedencia. La interrogante debatida era la siguiente: “¿Cuál es el alcance del trayecto en función de la velocidad inicial de un proyectil?” o en otras palabras, “¿Cuál es la distancia máxima de penetración del proyectil disparado?”. Para aclarar este punto, a continuación, se adjunta un fragmento de uno de los dictámenes emitidos en materia de medicina forense sobre este caso:

Con fundamento a la lectura, estudio y análisis del dictamen de necropsia de quien en vida llevara el nombre de RESERVADO, relacionado con la carpeta de investigación RESERVADO. Realizada el día RESERVADO, iniciando a las RESERVADO y terminando a las RESERVADO.

El resultado es el siguiente: *El cadáver corresponde a un sujeto femenino, de 18 años de edad, estatura de 169 centímetros, 91 centímetros de perímetro torácico y 89 centímetros de perímetro abdominal.*

Lesiones al exterior: *Herida por proyectil de arma de fuego con orificio de entrada de forma oval de 9x6 milímetros, con escara periférica de 4 milímetros de predominio posteroinferior, situada en la cara lateral del hemitórax derecho a 29 centímetros por fuera de la línea media anterior y a 117 centímetros del plano de sustentación, penetrante y sin orificio de salida. Equimosis violácea de forma irregular de 12x10 centímetros situada en la cara lateral del hemitórax izquierdo a 21 centímetros por fuera de la línea media anterior y a 108 centímetros del plano de sustentación.*

Abiertas las grandes cavidades encontramos lo siguiente:

Cavidad torácica y abdominal: *Hecha la disección de la región se ve que el proyectil de arma de fuego descrita en lesiones al exterior siguió una dirección de derecha a izquierda, de atrás a adelante y de arriba a abajo, lesionando en su trayecto piel, aponeurosis superficial, músculos de la región, los músculos del noveno espacio intercostal, penetra a la cavidad torácica para continuar con las pleuras, cruza el seno costodiafragmático, nuevamente pleuras, la cúpula diafragmática, peritoneo parietal, abandona la cavidad torácica y penetra a la cavidad peritoneal, continúa con la cara superior de la cara diafragmática del lóbulo derecho del hígado, sale del hígado por la cara posterior de la cara diafragmática, continua por el retroperineo, lesionando los músculos de la pared posterior del abdomen tanto a la derecha como a la izquierda del plano medio, peritoneo parietal, la cúpula izquierda del diafragma, pleuras, por lo que sale de la cavidad peritoneal e ingresa nuevamente a la cavidad torácica, cruza el seno costodiafragmático izquierdo, nuevamente pleuras, los músculos de la pared izquierda del abdomen de donde se extrae un proyectil metálico con camisa de color cobre, mencionado proyectil es el que produce la equimosis de color violácea situada en la cara lateral del hemitórax izquierdo.*

En resumen: Orificio de entrada situado en la cara lateral del hemitórax derecho a 29 centímetros por fuera de la línea media anterior y a 117 centímetros del plano de sustentación.

Punto de la bala alojada: cara lateral del hemitórax izquierdo a 21 centímetros por fuera de la línea media anterior y a 108 centímetros del plano de sustentación.

Una vez expuestos algunos ejemplos de hechos delictivos que involucran armas de fuego, se reitera que el objetivo de la presente tesis es demostrar que el estudio de un arma de fuego desde el punto de vista forense, cuenta con muchas áreas de oportunidad que no han sido lo suficientemente analizadas, siendo la balística de efectos (incluyendo la mecánica de lesiones) una de las áreas menos estudiadas.

1.1 FUNDAMENTOS DE BALÍSTICA

La balística es la especialidad encargada de estudiar el desplazamiento de un proyectil desde el momento en que se encuentra en el interior de un arma de fuego y se oprime el disparador, hasta que cesa por completo su movimiento como resultado de la desaceleración.

La balística forense, es una disciplina auxiliar de la criminalística cuyo estudio no se limita únicamente al análisis de los proyectiles, sino que incluye la observación de todos los elementos que contribuyen a la producción de un disparo y de los efectos que se llevan a cabo tanto en el interior del arma como durante el trayecto y los daños causados en el objetivo de un hecho presuntamente delictivo [7]. Su estudio incluye también el análisis de fragmentos, municiones y elementos con residuos de disparo como suelen ser objetos (generalmente muebles y prendas de vestir) y tejidos biológicos de víctimas de un disparo.

Antes de profundizar sobre este campo de investigación es importante establecer a qué nos referimos cuando hablamos de armas de fuego. La Real Academia Española (RAE) define un arma como *“un instrumento destinado para atacar o defenderse”* [8]. Por su parte, la Organización de los Estados Americanos (OEA) define un arma de fuego como *“cualquier arma que conste de por lo menos un cañón por el cual una bala o proyectil puede ser descargado (expelido) por la acción de un explosivo y que haya sido diseñada para ello o pueda convertirse fácilmente para tal efecto, excepto las armas antiguas fabricadas antes del siglo XX o sus réplicas.”* [9].

Citando a Ramírez Velázquez, [10] la balística se divide en tres grandes grupos:

1. **Balística interna:** estudia todos los fenómenos que ocurren en un arma durante el desplazamiento del proyectil en su interior.
2. **Balística externa:** es el estudio de la trayectoria que describe un proyectil. Comienza desde el momento en que el proyectil abandona la boca del cañón del arma, hasta el instante en que impacta con alguna superficie.
3. **Balística de efectos:** es el análisis de los resultados que se manifiestan en los materiales u organismos y los daños que se producen desde el momento en que el proyectil realiza el impacto.

1.1.1 CLASIFICACIÓN DE ARMAS DE FUEGO

De acuerdo al Manual para la Capacitación y Evaluación de Competencias Básicas de la Función para los Integrantes de las Instituciones de Seguridad Pública, las armas de fuego se clasifican de la siguiente forma [10]:

- a) Por su manejo:
 - **Portátiles:** no son de gran tamaño, por lo que una sola persona es suficiente para su uso y su manejo.
 - **No portátiles:** armas de gran peso y tamaño que requieren de varias personas o algún otro medio para transportarse y utilizarse, como lo son las ametralladoras.

b) Por su longitud:

- **Cortas:** el cañón tiene una longitud menor a 30 cm.
- **Largas:** el cañón tiene una longitud mayor a 30 cm.

c) Por su funcionamiento o sistema de disparo:

- **Tiro a tiro:** pueden efectuar un solo disparo por vez, por lo que debe extraerse la vaina reemplazándola por un nuevo cartucho, como la escopeta de caza.
- **Repetición:** a través de sistemas como el cerrojo, corredera o palanca, debe accionarse un mecanismo manual para subir la munición de la recámara y realizar cada disparo.
- **Semiautomáticas:** la munición se carga automáticamente después de realizar cada disparo y la recuperación del cerrojo se hace también de manera automática por la acción mecánica del resorte, pero es necesario oprimir el disparador cada vez que se desee realizar un disparo.
- **Automáticas:** las armas automáticas o de ráfaga producen descargas continuas hasta que se libera el disparador o bien, hasta que se agotan las municiones que posea.

Además de la clasificación antes mencionada, Seguridad Integral Empresaria S.A. (SIE) establece tres clasificaciones más [11]:

d) Por su forma de empleo o apoyo:

- **De puño:** cuentan con un diseño para ser utilizadas con una sola mano, como el revólver o la pistola.
- **De hombro:** son de mayor peso y tamaño que las armas de puño, por lo que requieren el empleo de ambas manos o incluso, de otra parte del cuerpo, generalmente el hombro. Algunos ejemplos son las escopetas y los fusiles.

e) Por la forma de carga:

- **De avancarga:** armas primitivas que recibían el cartucho, proyectil o granada por el plano de fuego; solían ser cargadas por la boca del cañón, como las escopeta “chispa”.
- **De retrocarga:** se cargan por la recámara ubicada en la parte media trasera del arma; en esta clasificación se encuentran revólveres, pistolas, rifles, carabinas, metralletas y demás armas de moderno diseño.

f) Por el interior del cañón o ánima:

- **De cañón de ánima lisa:** carece de estriado, cuenta con una superficie interna pulida o tersa. El ejemplo más claro de esta clasificación son las escopetas.
- **De cañón de ánima rayada o estriada:** el interior del cañón del arma presenta un rayado conformado por un conjunto de diseños longitudinales en forma de surcos. La función del estriado es brindar estabilidad direccional a la trayectoria de un proyectil al producir movimientos rotacionales sobre su propio eje durante su paso a través del cañón del arma. El sentido de giro de las estrías del ánima puede ser hacia la izquierda (levógiro) o hacia la derecha (dextrógiro), vista desde la culata; la mayoría de las armas presenta un sentido dextrógiro.

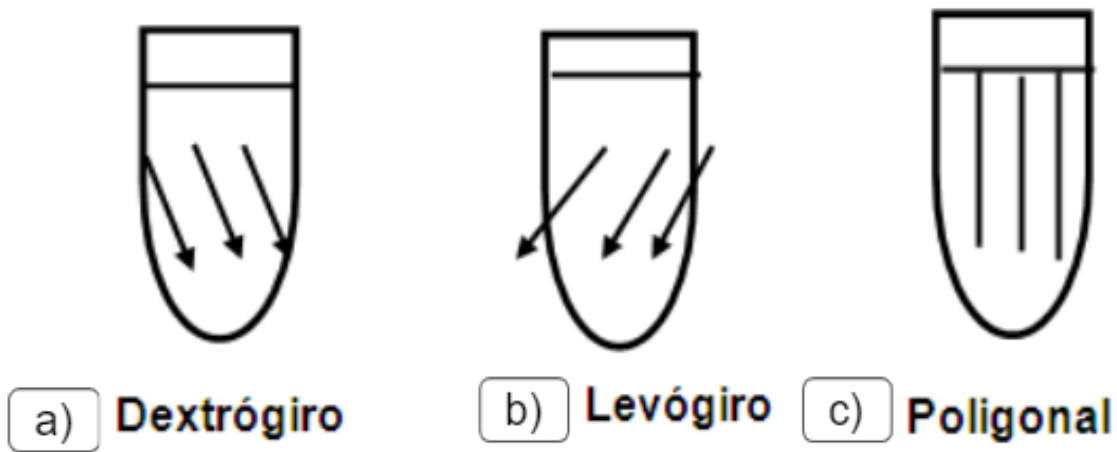


Figura 3. Tipos de rayado de una bala de acuerdo al interior del cañón: a) dextrógiro, b) levógiro y c) poligonal. [11]

- **De cañón de ánima poligonal:** el ánima tiene forma de polígono (figura limitada con 3 o más lados rectos) por lo que su calibre es el diámetro de la circunferencia entre dos campos. Este rayado se realiza a través de un método de martelado o forjado en frío, provocando que el interior del cañón presente un coeficiente de rugosidad muy bajo. Estos cañones pueden disparar balas comunes de sección circular, presentando ventajas como la disminución del encobramiento/emplomamiento y la mejora en el sellado de los gases que a su vez, aumenta la velocidad inicial del proyectil. Las armas Glock® presentan este tipo de rayado.

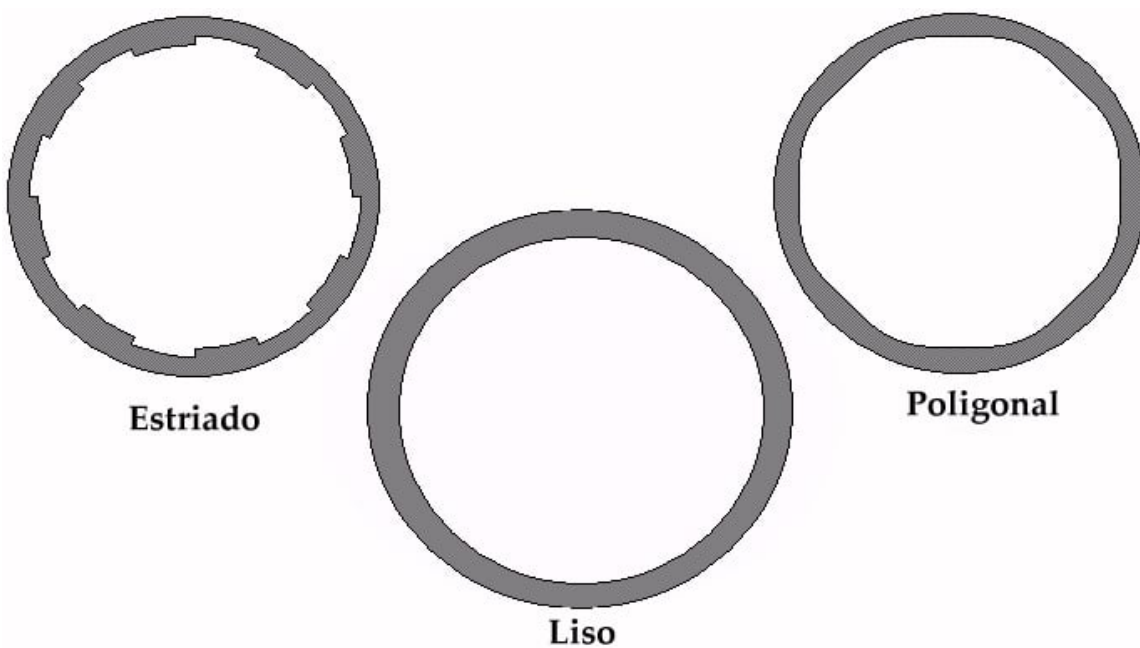


Figura 4. Tres tipos principales del cañón de un arma de fuego: estriado, liso y poligonal. [11]

El rayado de un cañón está compuesto por un número igual de surcos y relieves, que pueden ser de 2 a 20 y consta de los siguientes elementos:

1. Campo de estría/de macizo: superficie del ánima que cuenta con una medida definida.
2. Estría: surco o bajo relieve que se encuentra en el ánima.
3. Macizo: parte saliente o prominente que queda entre dos estrías
4. Flanco: paredes laterales de una estría
5. Arista viva: esquina sobresaliente que se forma entre el campo de macizo y el flanco; determina la vida útil de un cañón hasta llegar a su “muerte balística”
6. Arista curva: esquina cóncava formada entre el flanco del macizo y el campo de estría

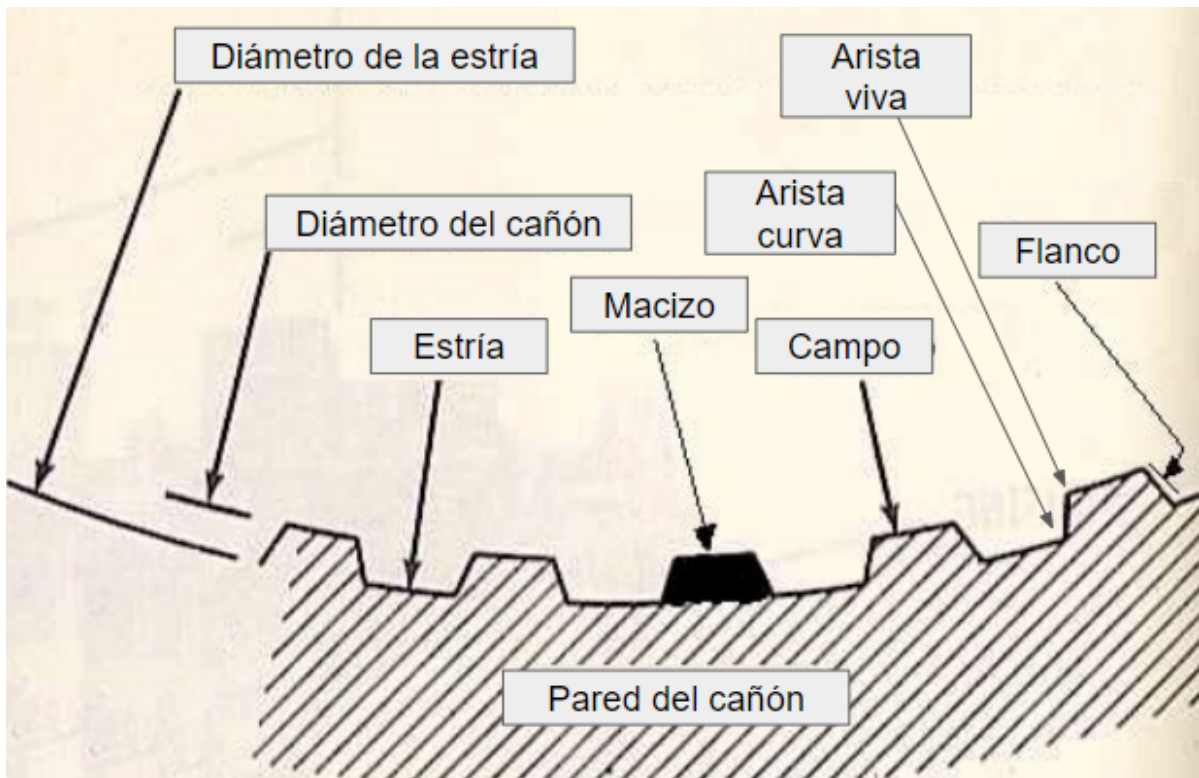


Figura 5. Diagrama de un corte transversal de la vista de un cañón con ánima estriada. [11]

Si bien en la presente tesis se cuenta con datos empíricos de efectos de balas disparadas con distintos tipos de armas, el objeto de estudio principal se centra en los efectos relacionados con proyectiles 9 mm disparados por un arma Glock® Modelo 17 calibre 9 x 19 mm. Esta arma es portátil, con ánima poligonal, operable con un solo puño, corta y bajo un sistema de disparo semiautomático.

1.1.2 PISTOLA GLOCK® MODELO 17 CALIBRE 9 x 19 mm

“Glock” es el nombre que solemos dar a una familia de pistolas semiautomáticas diseñadas y fabricadas por la compañía austriaca Glock AG de Deutsch-Wagram, misma que inició con la fabricación de diversas herramientas y cuchillos y en el año 1983 comenzó la fabricación de armas de fuego para el ejército. Desde entonces, la pistola Glock® ha adquirido una buena reputación por su confiabilidad y simplicidad, siendo hoy en día una de las más populares en todo el mundo, de modo que, tanto diversas fuerzas de la OTAN, autoridades policiales y de seguridad han adoptado esta arma [12].

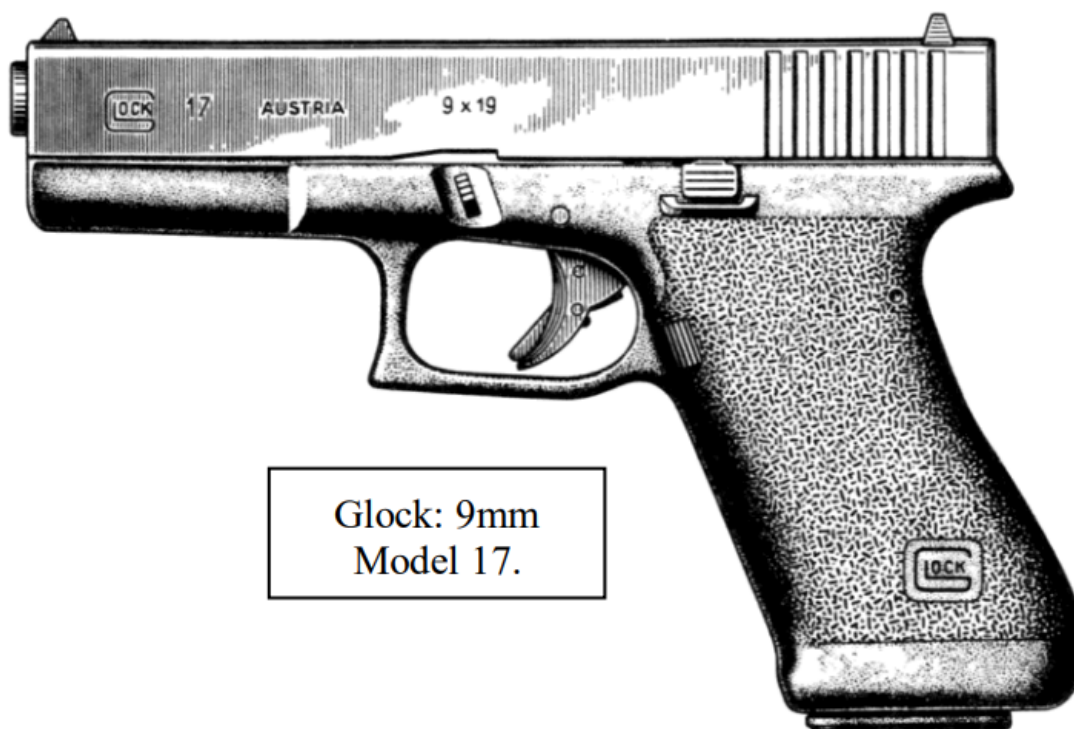


Figura 6. Ilustración de pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, modelo 17 [13].

Debido a que la pistola Glock® modelo 17, es el patrón en el que el resto de los modelos han sido basados, se explicará su funcionamiento: el mecanismo de disparo es conocido como *auto-amartillado* o *safe action*, es decir, en el momento en que el tirador oprime el disparador, tres mecanismos automáticos e independientes entre sí, se activan:

1. Seguro del disparador (trigger safety),
2. Seguro de la aguja percutora (firing pin safety)
3. Seguro contra caídas (drop safety)

La presión ejercida sobre el disparador desactiva o desconecta un dispositivo de seguridad; posteriormente, amartilla el percutor (mismo que se encuentra en una posición segura de “medio amartillado”) que, enseguida se suelta para realizar el disparo. Esa peculiaridad conocida como “seguro de caída” se desactiva al presionar el disparador después de haberse desactivado el “seguro de disparador” y, posteriormente, el “seguro de percutor”. Una vez que el disparador vuelve a su posición original, los tres sistemas se activan nuevamente de forma automática [13].

1.1.3 CARTUCHOS

Un cartucho es un recipiente generalmente metálico, cuyo objetivo es conseguir que una bala o proyectil sea lanzado por un arma de fuego, en condiciones de energía, precisión y distancia determinadas. Como muestra la figura 7 las partes de un cartucho son:

- **Vaina:** parte más larga del cartucho en donde se encuentra la pólvora y la cápsula iniciadora. A su vez, cuenta con diversas estructuras, aunque no todas están presentes siempre:
 - 1.- **Culote:** fondo o base del cartucho; posee una forma plana por la parte exterior y lleva una pestaña y/o una ranura de extracción.
 - 2.- **Cuerpo:** estructura de forma cilíndrica o troncocónica. Su tamaño es mayor en el culote y decrece hacia la boca.
 - 3.- **Gola y Gollete:** tronco de cono que produce un estrechamiento en el cartucho.
 - 4.- **Boca:** es la parte abierta del cartucho que sostiene la bala.
- **Bala:** estructura del cartucho que, en conjunción con el arma, está diseñado para que sea expulsada a través de la boca del cañón a una determinada velocidad, sin presentar deformaciones anormales, y manteniéndose en la trayectoria que le corresponda para lograr alcanzar el objetivo. Es el agente vulnerante en casos que involucran armas de fuego.



Figura 7. Esquema de las partes que componen el cartucho que puede ser utilizado en armas de ánima rayada [11]

La longitud que presenta la vaina es correspondiente con el tamaño de la recámara del arma, de modo que un mismo cartucho puede utilizarse en diferentes armas, por ejemplo, el calibre 7.65 mm es usado para revolver, pistola y fusil, pues la recámara de estas armas, comparte el mismo tamaño. Para efectos de este trabajo, la forma que presenta la vaina correspondiente al cartucho 9 mm Parabellum utilizado, es ligeramente troncocónica.

Además del calibre y la longitud de la vaina, una de las principales clasificaciones de los cartuchos se basa en el tipo de ignición o percusión que posean:

- Fuego anular: en este sistema, el culote de la vaina presenta un reborde hueco que aloja el fulminante. La aguja percutora golpea contra cualquier punto de este reborde provocando la inflamación del fulminante. El culote de este tipo de cartuchos, es fino toda vez que no cuenta con un alojamiento para la cápsula iniciadora. El cartucho .22 pertenece a esta familia.
- Fuego central: el punto central del culote aloja una cápsula iniciadora que contiene en su interior el fulminante; este punto es donde la aguja realiza la percusión. El grosor del culote es mayor que el del cuerpo del cartucho.

1.1.4 HUELLAS DEL PERCUTOR

El percutor es una pieza que está integrada al martillo o bien, separada de éste, cuya función es realizar un desplazamiento con una energía lo suficientemente intensa para golpear con la punta el capsul que contiene el compuesto incendiario que a su vez, reacciona produciendo una flama que se transformará en gas mediante la generación de calor y fuerza impulsora [14,15]. Al momento en el que el percutor golpea la base del casquillo para activar el fulminante (independientemente del tipo de percusión) deja una huella distintiva, conocida como “forma”, misma que dependerá de la profundidad de acuerdo a las condiciones en las que se encuentre el arma, ya que entre más limpia y nueva sea el arma, más profunda será la marca que permanecerá en el culote.

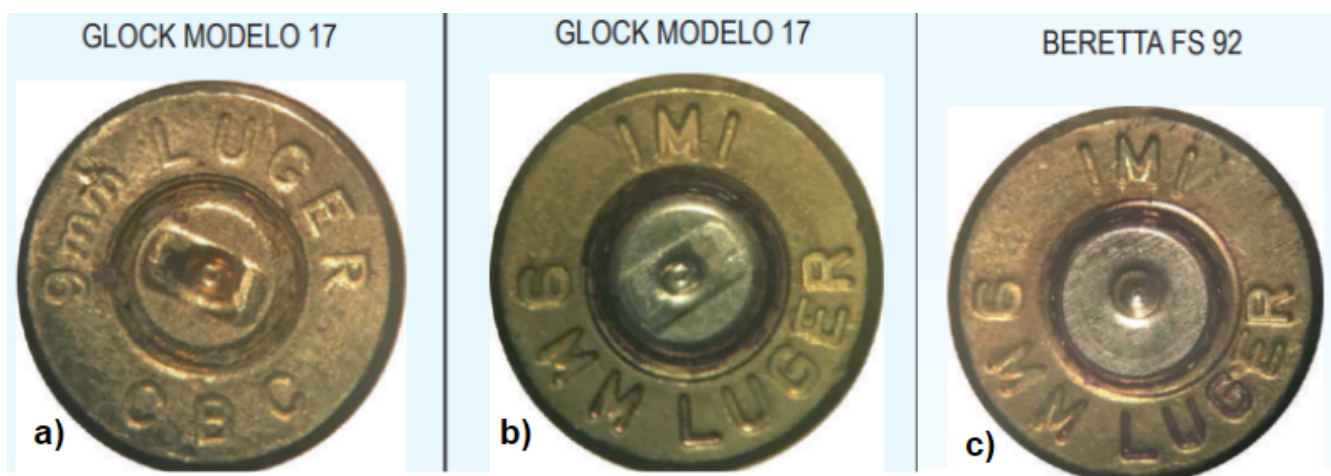


Figura 8. Fotografías de los culotes perteneciente a vainas percutidas por distintas armas: a) y b) percutidos por pistola Glock® modelo 17; c) percutido por Beretta® FS92 (únicamente para fines demostrativos) [15]

Las agujas percutoras de las pistolas Glock® producen sobre la cápsula fulminante un marco u “hoyo” de percusión con características distintas al del resto de las armas. Como se observa en la figura 8, las cápsulas que fueron percutidas por pistolas Glock® presentan un hoyo propiamente dicho de forma circular y alrededor de éste, se genera una forma rectangular en alto relieve, mientras que en otras pistolas, como la Beretta® FS 92, por ejemplo, únicamente se presenta el hoyo de percusión con una forma circular [15].

Esta peculiaridad representa un apoyo para discernir macroscópicamente una cápsula que ha sido disparada por una pistola Glock®, pero no debe perderse de vista que este análisis extrínseco no representa un método objetivo de identificación, sino que sólo es una aproximación que permite descartar basado en coincidencias observables a simple vista que, posteriormente, muy probablemente derivará en un análisis intrínseco, como lo es la observación a través de un microscopio de comparación balística.

1.1.5 CALIBRE

Una de las principales características para agrupar proyectiles de arma de fuego es de acuerdo al calibre, lo que se refiere al diámetro del interior del cañón o ánima del arma, medida que a su vez, guarda correspondencia con el diámetro del proyectil en su parte más ancha que suele ser en donde se conecta con el casco o vaina [16]. El diámetro de la bala suele ser ligeramente mayor que el del ánima del cañón con el objetivo de evitar que haya una fuga de gases provenientes de la combustión de la pólvora.

El calibre de las armas rayadas se mide en milímetros o pulgadas de acuerdo a lo establecido por el patrón oficial de medidas prevaleciente en cada país. Según la tradición norteamericana el calibre se expresa en milésimas de pulgada, mientras que en varios países de Europa, el calibre se expresa en unidades de milímetros.

Tabla 1. Comparación de expresiones de calibre de armas de fuego entre EEUU y Europa

ESTADOS UNIDOS	EUROPA
.22	5.6 mm
.25	6.35 mm
.30	7.62 mm
.32	8.1 mm
.38	9 mm
.44	11.17 mm
.45	11.43 mm

Gracias a esta medida, es posible asociar una arma de fuego con un proyectil, sobre todo en casos en los que se desee validar la existencia del principio criminalístico de correspondencia entre un proyectil disparado y un arma.

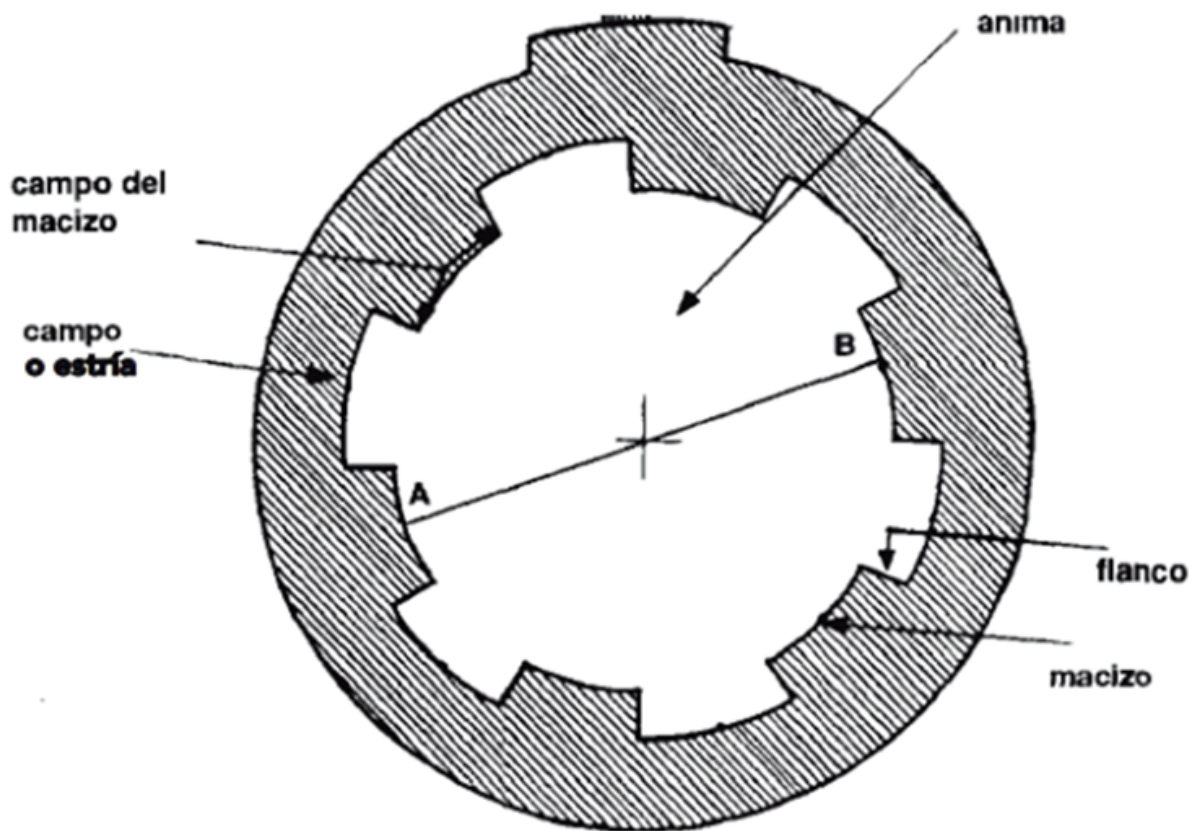


Figura 9. Esquema del calibre real observado desde el interior del cañón de un arma de fuego. Los macizos presentan relieves, lo que significa que el calibre real es el diámetro entre el punto A y el punto B. [14]

Tipos de calibre

Los calibres de un proyectil y de un arma presentan pequeñas variaciones debido a que el altorrelieve del ánima del cañón, corresponderá al bajorrelieve que se producirá en el proyectil, conocido como “rayado” o “estria”.

- 1.- Calibre real:** es el diámetro objetivo y real que se obtiene al medir la distancia que existe entre macizos o partes más elevadas del “altorrelieve” del estriado de un cañón.
- 2.- Calibre nominal:** opuesta a la medición anterior, el calibre nominal se refiere a la distancia que se presenta entre los “bajorrelieves” o “estrias”, por lo que suele ser ligeramente mayor que el calibre real.

Calibre 9mm Parabellum

El cartucho de calibre 9 mm se ha convertido en uno de los más utilizados en pistolas en todo el mundo debido a que presenta trayectorias estables y retrocesos moderados al momento en el que se realiza el disparo. Además su tamaño es pequeño y los recursos para su producción son económicos. Al tratarse de la munición más extendida para armas cortas, se apega a todos los estándares establecidos por la Organización del Tratado del Atlántico Norte (OTAN).

Las características del calibre 9 mm Parabellum son:

- Dimensiones: 9.65 x 19.15
- Peso: alrededor de los 7.5 gramos
- Diámetro: 9.02 mm
- Velocidad media 350 m/s.

Algunas otras denominaciones con las que se conoce a este calibre, son:

- | | |
|--------------|-------------------|
| - 9mm | - 9x19 NATO |
| - 9mm NATO | - 9x19 Parabellum |
| - 9x19mm | - 9x19mm PARA |
| - 9 mm Luger | - 9x19 XP |

Este tipo de bala nos interesa en especial en esta tesis. Serán sus efectos dentro de un medio resistivo plástico (maniquí biológico de gel) los que se analicen a detalle.

1.2 BALÍSTICA DE HERIDAS

La balística de efectos es una rama de la balística terminal encargada del estudio de las alteraciones causadas como consecuencia de la penetración de un proyectil en el material impactado, por lo que se conoce como balística de heridas a una división de esta especialidad forense, cuyo objetivo es el estudio de los efectos y el comportamiento de un proyectil cuando la superficie de impacto es tejido humano o animal [17]. Es una rama de conocimientos empíricos, pues se basa en observaciones y en especial de experimentos que permiten la formulación de explicaciones a través de modelos físico-matemáticos, que permiten realizar predicciones comprobables con precisión.

A su vez, la balística de heridas puede dividirse en tres grupos: **A)** proyectiles de arma de fuego cortas, **B)** proyectiles de armas de fuego largas y **C)** fragmentos. Esta subclasificación depende de las características de cada tipo de proyectil en cuanto a la forma, la estructura y la energía con la que viaja el bólido. Cada uno de estos factores son causas de que un proyectil presente un comportamiento determinado durante el impacto y una formación específica del *canal*, mejor conocido como la *cavidad temporal*, que se explica en la sección 1.2.6 del presente trabajo.

1.2.1 MORFOLOGÍA DE LAS HERIDAS

Una herida o lesión puede definirse como un daño en el cuerpo o en la salud, causado por cualquier agente externo que genera una perturbación funcional u orgánica a la vida, al cuerpo o a la salud [17].

Las lesiones causadas por proyectiles de armas de fuego son de carácter contuso, puesto que son la resultante del choque de un cuerpo duro y romo (*i.e* sin filo) contra el organismo. Las heridas contusas no suelen presentar una solución de continuidad de la piel. Sin embargo, la gravedad de una herida contusa depende de la intensidad del golpe más que por el propio objeto generador, por lo que en el caso de las heridas por proyectiles provenientes de un arma de fuego, la fuerza del impacto supera la resistencia y elasticidad de la piel.

La ausencia de un cuerpo o mecanismo cortante provoca que la sección sea irregular o incompleta y que los bordes sean desiguales con infiltraciones hemáticas. Otra característica importante de este tipo de lesiones es que provocan retracción de los tejidos blandos como músculo, piel y estructuras vasculares.

Mecanismo de acción de las lesiones contusas:

- **Percusión:** se refiere al efecto de “golpear”, por lo que debe tomarse en cuenta el plano de resistencia, la fuerza aplicada y la naturaleza del agente vulnerante.
- **Compresión:** los tejidos son sometidos a una presión que puede ser rápida (proyectil de arma de fuego, atropellamiento) o prolongada (caída de un objeto de gran peso sobre alguna estructura biológica).
- **Fricción:** esta característica suele presentarse en objetos con un borde cortante, pero en el caso de las heridas por armas de fuego, el proyectil provoca una solución de continuidad, facilitando la penetración en los tejidos, sobre todo, en los tejidos blandos del organismo.
- **Tracción:** avulsión o arrancamiento de tejidos. Este mecanismo es observable en el orificio de salida de una herida por arma de fuego.

Para efectos de esta tesis, únicamente se tratarán las heridas que causa una bala proveniente de una pistola, ya que existe una gran variedad de agentes mecánicos productores de heridas con características diversas. Por ejemplo, una herida producida por el disparo de un cartucho de escopeta, no será similar a aquella que es producto de un proyectil de un revólver.

Conforme un proyectil se aproxima a su diana y avanza en el interior del organismo, diversos efectos comienzan a aparecer. En los siguientes párrafos revisaremos algunos signos que se pueden encontrar en una herida.

1.2.2 ORIFICIO DE ENTRADA Y SALIDA

El estudio de las heridas u orificios de entrada de un proyectil brindan información sobre la distancia aproximada a la que se realizó el disparo (posición a la que se encontraba la boca del cañón del arma de fuego) y otras características como el tipo de proyectil o incluso, el tipo de arma utilizada aun cuando la sección corporal herida hubiera estado cubierta.

Hoy en día, no existe una homologación en la terminología para establecer cuantitativamente las distancias de los disparos. Zambrano, J. N. *et al.*, afirman en el artículo “*Distancia de disparo y su interpretación frente a la conducción de hostilidades en el conflicto armado Colombiano*”, que de observar residuos macroscópicos de disparo, entonces, se considera que fue un disparo a “corta distancia”. En contraste, si estos residuos son indetectables en la superficie y sólo se observa el orificio de entrada con su respectivo anillo de enjugamiento, se denomina que el disparo se efectuó “a larga distancia” [18].

Por su parte, diversa bibliografía establece que existen otras clasificaciones dependiendo de la distancia a la que se realiza un disparo:

- a) **Contacto firme:** la boca del cañón del arma está apoyada sobre la superficie o zona de disparo.
- b) **Contacto laxo o corta distancia:** entre la boca del arma y la superficie de contacto existe una distancia máxima de 20 cm.
- c) **Distancia intermedia:** la distancia entre la boca del arma y la superficie de contacto va entre los 20 cm y un metro.
- d) **Larga distancia:** existe una distancia mayor de un metro entre el arma de fuego y el blanco.

Sin importar la distancia del disparo, los proyectiles suelen arrastrar fibras textiles al interior de la herida y hacia la cavidad temporal, por lo que se han hallado estas fibras en cantidades mínimas en el orificio de salida del proyectil. Cabe mencionar que existen estudios que muestran cómo ciertas capas de ropa gruesas aumentan la posibilidad de infección de una herida, además de su intervención en la deformación de la bala, haciendo que el tamaño de la cavidad temporal sea de mayor tamaño y que las fracturas óseas provocadas sean más extensas [16].

Dependiendo de la distancia del disparo, serán los efectos en las víctimas o sobre el plano de la piel. Un disparo a corta distancia causa efectos térmicos de duración breve en el área afectada que se manifiestan a través de una transformación de la hemoglobina y la mioglobina en carboxihemoglobina y carboximioglobina respectivamente, como resultado de las altas concentraciones de CO (monóxido de carbono) presentes en los gases propulsores al momento de la deflagración de la pólvora.

1.2.3 EFECTOS DEL PROYECTIL EN LA PIEL

Al impactar sobre la piel, el proyectil produce heridas contusas después de vencer la resistencia elástica. Uno de los signos más importantes para determinar que se trata de un orificio de entrada es el anillo de Fisch, constituido por la superposición de un anillo contusivo-excoriativo o de contusión que forma una lesión equimótica y excoriativa, que son resultado de la ruptura de los capilares de la dermis con extravasación hemática y formación de costra; y un anillo de enjugamiento que contiene un gran depósito de impurezas que “arrastra” el proyectil desde su salida del arma. Aunque, no siempre estará presente; por ejemplo por la interposición de cabellos o ciertas fibras textiles [10].

La forma del anillo de Fisch es fundamental para determinar el ángulo de incidencia de un proyectil. Por ejemplo, en la figura 10 se ilustra un anillo completamente simétrico y redondeado, lo que significa que el ángulo de incidencia es perpendicular a la superficie. Por otra parte, la figura 11 representa un anillo de forma oval con una zona de choque mayor que el resto del anillo como resultado de un ángulo incidente agudo.

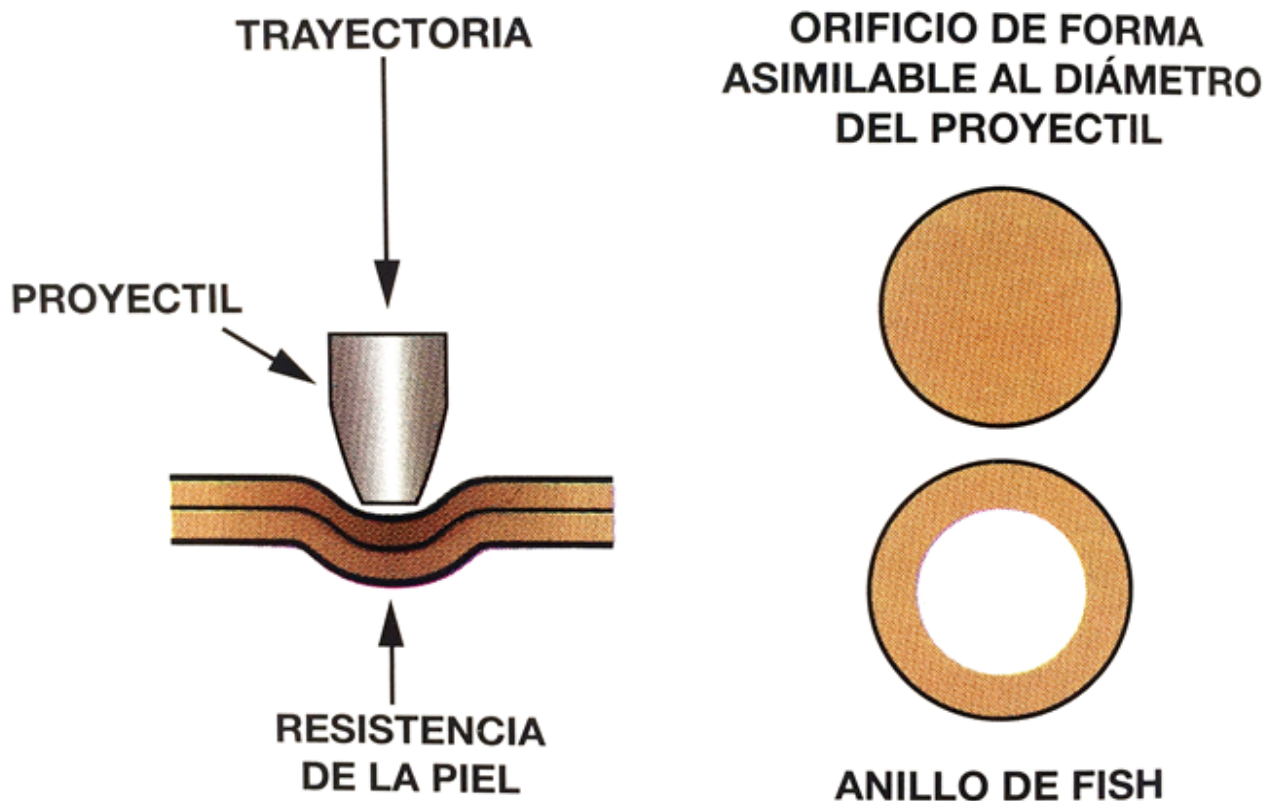


Figura 10. Esquema de la forma del orificio de entrada de la piel con un ángulo de incidencia perpendicular. [10] p. 112.

El tamaño que presentará un orificio de entrada y uno de salida estará determinado por las modificaciones de la cantidad de energía transferida por el proyectil conforme avanza a lo largo del canal de la herida producida. Los bordes que presenta un orificio de entrada suelen ser regulares e invaginados o invertidos siempre y cuando no exista un plano óseo debajo de la piel, ya que el contacto con tejido duro produce el efecto de “golpe de mina”, mejor conocido como signo de Hoffman, caracterizado por un estallido de la piel debido al choque de los gases de la deflagración contra el plano óseo, dejando quemaduras en los bordes y depósitos negros de humos y de granos de pólvora [10].

Las heridas u orificios de salida de los proyectiles también poseen elementos característicos diferenciables de los orificios de entrada. Uno de los principales signos visibles en este tipo de heridas, son los bordes evertidos o sobresalientes de la piel que se observan, como su nombre lo indica, hacia afuera como resultado de la ruptura de la misma, por lo que adquieren formas irregulares y de tamaños variables, a diferencia del orificio de entrada como lo muestra la tabla 2. Además, estos orificios presentan una infiltración hemática escasa y carecen tanto de anillo de Fisch como de tatuajes [17].

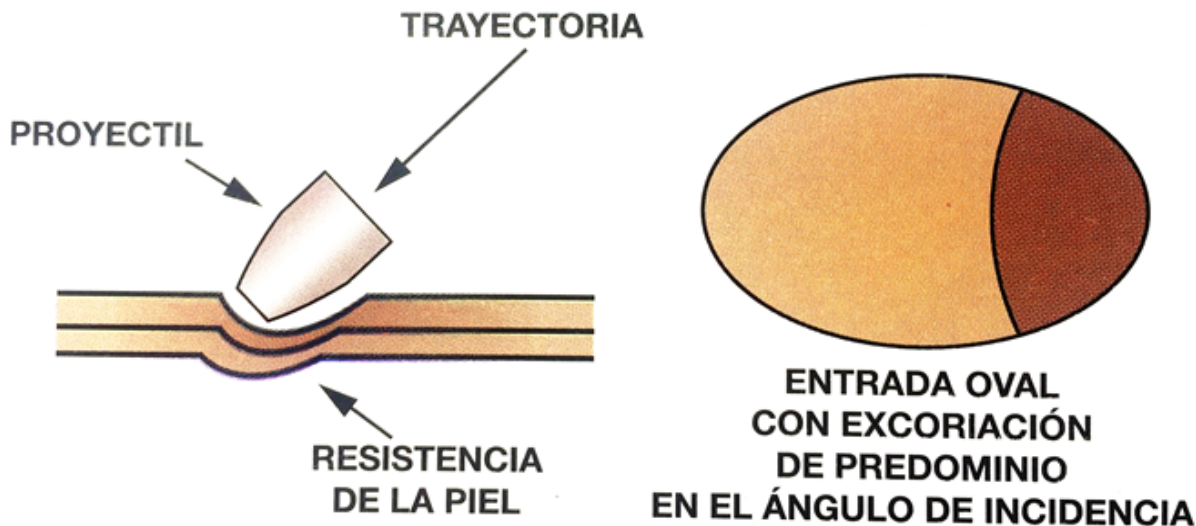


Figura 11. Esquema de la forma del orificio de entrada de la piel con un ángulo de incidencia agudo.[10] p. 113.

Una excepción en la que es posible observar un anillo de contusión en un orificio de salida, es en aquellos casos en los que la salida del proyectil ocurre entre la zona de contacto corporal y una superficie sólida como suele ser el pavimento, alguna pared o un mueble, provocando una deformación parcial del proyectil, produciendo ruptura de la piel y la formación de un halo contusivo. Este fenómeno de “choque” del proyectil contra el cuerpo duro recibe el nombre de *signo de Románese* [18].

Tabla 2. Comparación de características entre el orificio de entrada y el orificio de salida.

Característica	Orificio de entrada	Orificio de salida
Bordes	Regulares e invertidos	Irregulares y sobresalientes
Tamaño	Generalmente más pequeño que el orificio de salida	Generalmente más grande que el orificio de entrada
Infiltraciones hemáticas	Abundantes	Escasas
Anillo de Fisch	Presente	Ausente
Tatuajes (real o falso)	Presente (dependiendo de la distancia)	Ausentes
Quemaduras	Casi siempre presentes	Ausentes
Ahumamiento	Casi siempre presente	Ausente

1.2.4 EFECTOS DE LA PÓLVORA

El efecto más común debido a la presencia de la pólvora es el tatuaje. El tatuaje se observa en la piel como múltiples incrustaciones de color negro resultantes de partículas de pólvora incombusta de un disparo efectuado a una distancia intermedia (entre 20 cm y un metro) [17]. Se conoce como “tatuaje verdadero” cuando presenta quemaduras provocadas por la llama al momento de disparo y pequeños granos de pólvora incrustados, mientras que existe también un “tatuaje falso” o “ahumamiento” en el que se observa únicamente un depósito de negro de humo. Otro tipo de tatuaje falso se presenta cuando el proyectil impacta o atraviesa alguna superficie antes de contactar con el cuerpo; el caso más común se presenta cuando se encuentra un cristal entre el arma y la víctima, por lo que habrá presencia de un tatuaje falso causado por polvo de cristal. La diferencia entre un tatuaje real y uno falso, es que el real no desaparece al manipular o lavar la zona, mientras que el falso, desaparecerá casi por completo. La figura 12 representa cómo la distancia es la variable más importante en la presencia o ausencia de este efecto.

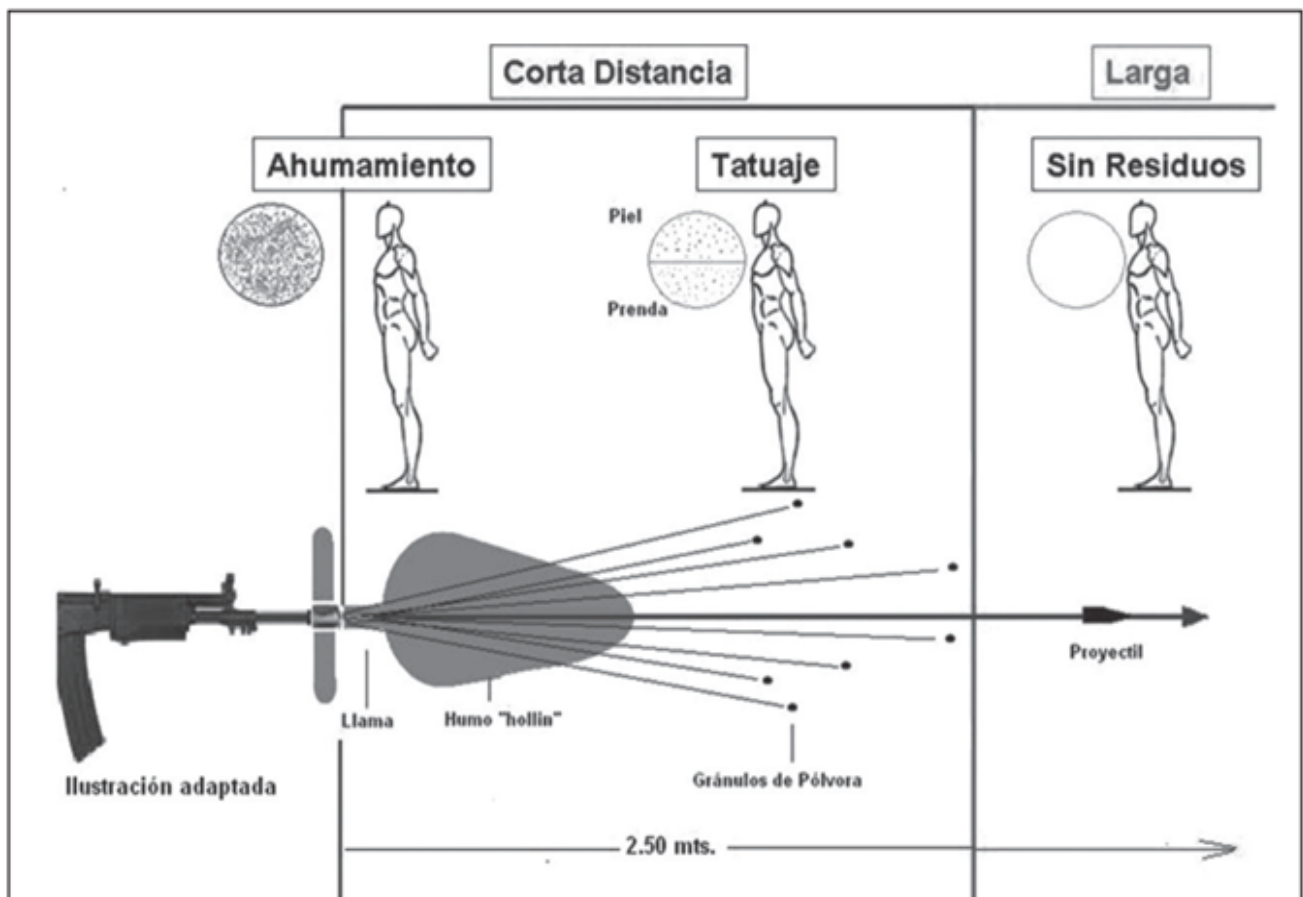


Figura 12. Esquema de la relación de los residuos macroscópicos y la distancia de disparo para un arma de fuego de alta velocidad [18]

1.2.5 CANAL DE LAS HERIDAS

En el momento en que la bala contacta con el cuerpo, se crea una onda de choque que se propaga a través de los tejidos a una velocidad aproximada a la del sonido y ocurren dos procesos físicos relacionados con la dinámica de fluidos: aplastamiento y estiramiento. Durante el aplastamiento, se produce una deformación inelástica del tejido provocando que se comprima, rasgue, destruya, o bien, que se produzcan todos estos fenómenos dando como resultado un canal permanente de la herida. Por otra parte, cuando ocurren movimientos de estiramiento se formará una cavidad temporal detrás del proyectil una vez que atravesó el tejido. A pesar de que esta cavidad eventualmente se colapsa, casi todo el tejido de esta zona se modificará por destrucción como resultado de la creación de “bolsas de heridas”, típicas de una cavidad temporal y que apuntan radialmente hacia afuera desde el canal permanente de la herida [19].

El Comité Internacional de la Cruz Roja estableció un sistema de clasificación de heridas por armas de fuego dependiendo de los siguientes aspectos o puntos a evaluar: **1)** tamaño de la herida, **2)** dimensión del orificio de entrada (diámetro), **3)** dimensión del orificio de salida (diámetro), **4)** tipo de fracturas, **5)** lesiones en estructuras u órganos vitales y **6)** presencia de cuerpos metálicos (proyectil o fragmentos) [20]. En la tabla 3 se aprecia de qué manera es evaluada con una letra y un puntaje cada una de estas características.

Tabla 3. Sistema de clasificación de heridas por armas de fuego propuesto por la Cruz Roja. [20] p. 318.

Característica a evaluar		Puntaje	Descripción
E	Entrada	Medición en unidades de cm	Estimación del diámetro máximo del orificio de entrada
X	Salida	Medición en unidades de cm	Estimación del diámetro máximo del orificio de entrada (X = 0 si no existe orificio de salida)
C	Cavidad	C 0 C 1	¿La cavidad permite que entren dos dedos antes de la cirugía? No: C = 0; Sí: C = 1
F	Fractura	F 0 F 1 F 2	No existe fractura F = 0 Fractura simple F = 1 Fractura clínicamente significativa F = 2
V	Estructura Vital	V 0 V 1	¿Estructuras vitales como encéfalo o vísceras fueron dañadas? No: V = 0; Sí: V = 1
M	Cuerpo Metálico	M 0 M 1 M 2	¿Proyectil o fragmentos visibles en radiografías? No: M = 0; Un cuerpo metálico: M = 1; Múltiples cuerpos metálicos: M = 2.

Entonces, en el caso motivador de esta tesis se produjo un disparo a una distancia superior a los 10 metros pues no se encontraron, fragmentos o residuos indicativos de un disparo a menor distancia. El bólido contaba con suficiente velocidad para romper la piel, ingresar en el cuerpo y quedarse alojado en el costado contrario del ingreso. En el canal de heridas no se observó alguna huella de contacto entre la bala y algún hueso; de hecho, la bala recuperada carece de deformaciones. Entonces, podemos deducir que la bala contaba con una velocidad relativamente baja para permanecer en el cuerpo, pero suficiente para dañar órganos a su paso. Además, el trayecto del proyectil fue a través de piel, músculos estriados y lisos, sin contactar huesos.

Si bien el dictamen de medicina forense mencionado al inicio de este trabajo cuenta con algunos esquemas, no es posible su exhibición por motivos de confidencialidad. No obstante, se desarrollaron nuevos esquemas propios apoyados en una herramienta tecnológica novedosa. A continuación, en el apartado 1.3 presentamos un estudio de los órganos dañados por la bala mediante visualizaciones obtenidas mediante el sistema *Anatmage-Table*.

1.2.6 CAVIDAD TEMPORAL

La cavidad temporal se refiere a un desplazamiento de los tejidos de forma radial durante el momento en que el proyectil se desplaza en el interior del cuerpo [17]. Este efecto ocurre debido a la gran cantidad de energía cinética que la bala transfiere a un tejido y depende de la elasticidad del tejido, creando así un espacio hueco detrás de la bala e inicialmente, un vacío. Se entiende por energía cinética a aquella energía que posee un objeto debido a su movimiento y depende tanto de la velocidad como de la masa de dicho objeto; se trata de la capacidad o trabajo que permite que un objeto pase de estar en reposo a presentar determinada aceleración [21]. La extensión radial máxima que alcanzará la cavidad temporal dependerá del módulo de Young del medio penetrado y se producirá un colapso de algunos milisegundos después, debido a que una parte de la energía del proyectil se convertirá en energía elástica del tejido, provocando cambios o deformaciones elásticas, plásticas, o ambas, dependiendo de su composición y de las propiedades tisulares. En la mayoría de los casos ocurre un proceso de creación de otras cavidades más pequeñas como consecuencia de una parte restante de energía del proyectil que no fue utilizada.

Una vez que la energía elástica disponible se agota, se produce un aumento de temperatura a causa de las ondas de presión y la fricción interna. Al finalizar el trayecto del proyectil en el cuerpo, se determinará cuál es el volumen final de la cavidad temporal y de esto dependerá el grado del daño causado en las estructuras biológicas.

Es importante no confundir la formación de una cavidad temporal con la cavitación (o las llamadas aspiraciones en el vacío). Este segundo término se refiere a la aparición de burbujas en un cuerpo que se mueve a través de un fluido a velocidades tan altas que alcanzan un punto en el que la presión del líquido es inferior a la tensión del vapor [22].

1.3 VISUALIZACIÓN DE HERIDAS MEDIANTE *ANATOMAGE-TABLE*

El sistema *Anatmage-table* es una computadora táctil, amplia y operada en posición horizontal. A semeja a una mesa donde se despliegan y manipulan imágenes, en particular aquellas de interés médico (ver figura 13) [23]. Este dispositivo electrónico-digital dispone de una base de datos en imágenes sobre estructuras anatómicas humanas. Así, el instrumento permite visualizar modelos 3D de tomografías computarizadas de órganos, sistemas, aparatos y secciones anatómicas humanas [24]. Así, estos objetos virtuales se pueden cortar y orientar en planos convenientes para su observación. Además, permite realizar mediciones aproximadas a través de puntos de referencia ajustables, gracias a su interfaz táctil.

Si bien existen otras opciones tecnológicas para trabajar con modelos similares (como los teléfonos *smartphone*), esta mesa interactiva tridimensional de tamaño natural se diferencia de otros sistemas de imágenes por su software de radiología y su contenido clínico. Por tales características, el dispositivo es principalmente utilizado como complemento en el proceso enseñanza-aprendizaje del quehacer forense, en particular sobre temas médicos.



Figura 13. Fotografía del equipo *Anatmage-table* [23]

A pesar de que la *Anatome-Table* es un instrumento de alta tecnología, cuenta con algunas limitaciones, siendo una de las principales la imposibilidad de seleccionar y ajustar variables que permitan crear un “modelo personalizado”. Por ejemplo, al momento, no es posible seleccionar un modelo con una altura mayor a 1.50 m o bien, representar a una persona con obesidad y combinar así otra serie de variables físicas y patológicas del individuo, por lo que siempre se trabajará con una simulación con características estandarizadas de la que sólo es elegible el sexo. Debido a estas limitaciones del equipo, no es practicable construir un maniquí virtual de mayor precisión sobre el caso estudiado.

Por último, hasta nuestro conocimiento, esta es la primera vez que se utiliza el *Anatome-Table* en México para realizar pruebas que formen parte de un trabajo de tesis de licenciatura, específicamente en la Licenciatura en Ciencia Forense de la Universidad Nacional Autónoma de México. Si bien es cierto que, únicamente se utilizó esta herramienta para representar un modelo anatómico, puede afirmarse que cumple con el objetivo de ilustrar vistas y aproximar mediciones en un maniquí tridimensional de un ser humano, permitiendo la obtención de varias perspectivas de cómo es el trayecto del proyectil de arma de fuego al penetrar los tejidos blandos del cuerpo.

Se desarrollaron imágenes representativas de un maniquí biológico del sexo femenino que ilustra los segmentos anatómicos que sufren daño a causa de la penetración del proyectil de acuerdo al caso de estudio ocurrido en abril de 2019 que se menciona en la introducción de esta tesis. Gracias al *Anatome-Table*, se obtuvieron vistas desde ángulos estratégicos (centrales y frontales) y con cortes a diversas profundidades, a través de los cuales se observó una aproximación del trayecto y la dirección que siguió la bala. A continuación, se explicarán las imágenes clave.

Como muestran las figuras 14, 15, 16 y 17, en la cara lateral derecha, a 29 cm por fuera de la línea media anterior (distancia señalada con una línea verde) y a 117 cm de distancia con respecto al plano de sustentación se encuentra una marca roja que resalta la ubicación de un punto de referencia que representa el orificio de entrada del proyectil de arma de fuego. En la cara lateral izquierda, a 21 cm por fuera de la línea media anterior (distancia señalada con una línea verde) y a 108 cm de distancia con respecto al plano de sustentación se encuentra una segunda marca roja que indica la ubicación de un segundo punto de referencia que muestra la región de alojamiento del proyectil.

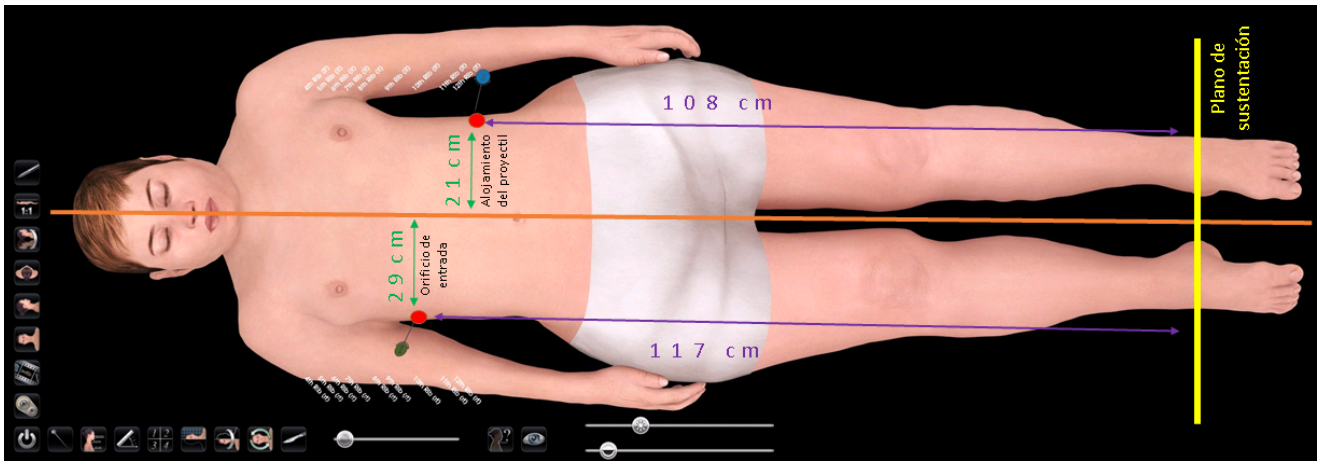


Figura 14. Captura de pantalla del maniquí biológico ubicado en posición de decúbito dorsal, desde una vista superior y cenital. Se observa una línea vertical (respecto al modelo anatómico) de color naranja que representa la línea media anterior, dividiendo al cuerpo en el plano derecho e izquierdo.

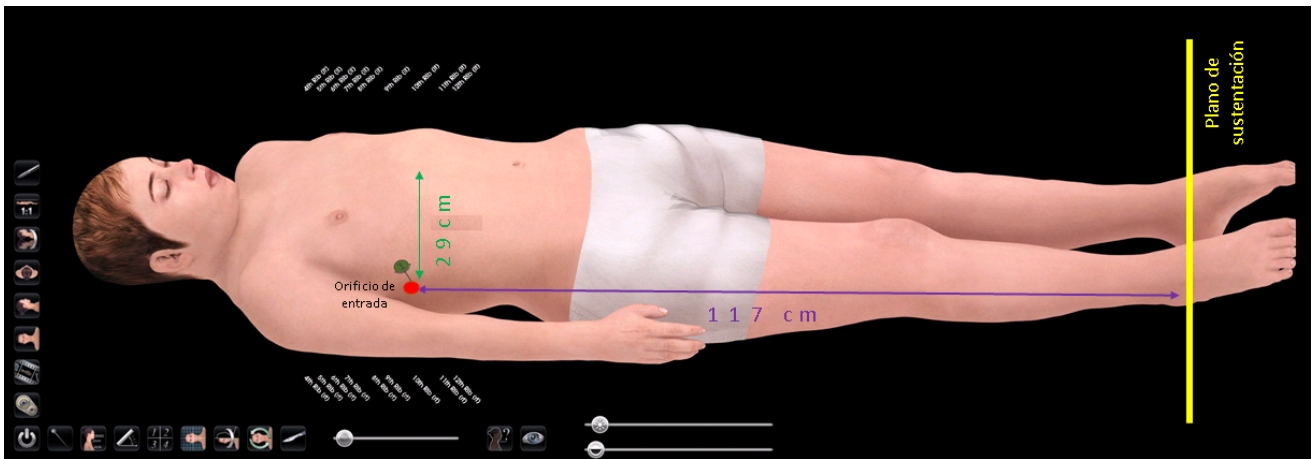


Figura 15. Captura de pantalla del maniquí biológico en posición de decúbito dorsal, vista lateral derecha. Se resalta la marca que indica el orificio de entrada del proyectil.

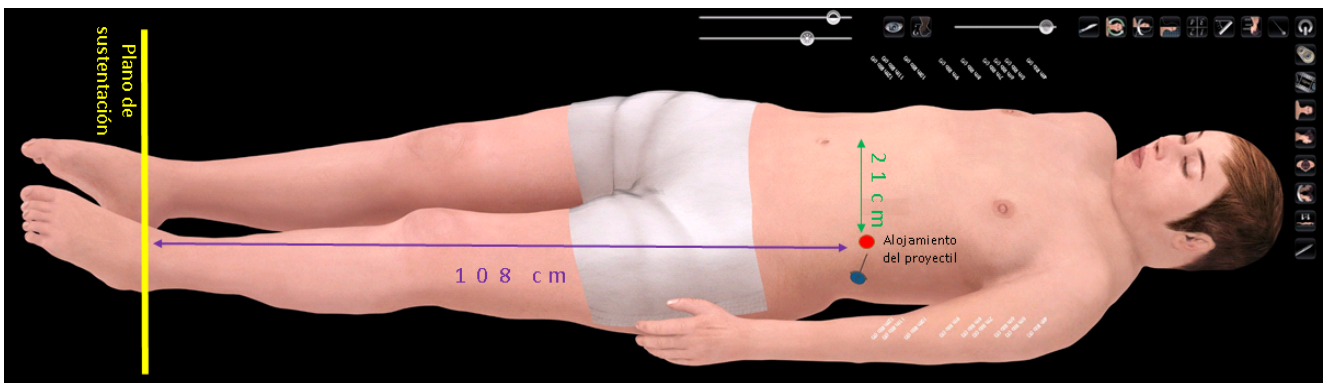


Figura 16. Captura de pantalla del maniquí biológico ubicado en posición de decúbito dorsal, visto desde el lado izquierdo. Se resalta la marca que indica la región de alojamiento o posición final del proyectil.

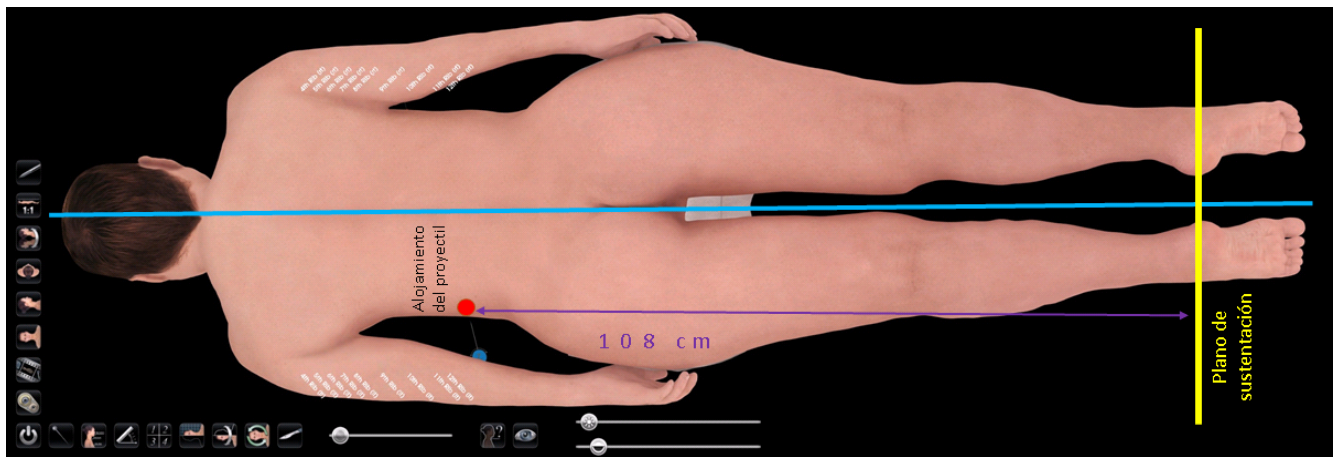


Figura 17. Captura de pantalla del maniquí biológico en posición de decúbito ventral, vista cenital. Al igual que en la figura 14, se divide el cuerpo en la región derecha e izquierda mediante la línea media posterior representada con una línea azul.

Por cuestiones desconocidas de la programación del software de la herramienta *Anatomage-Table*, no es posible la visualización de todas las marcas colocadas inicialmente en el modelo, cuando éste es rotado de tal manera que se observa sólo el plano posterior o dorsal del cuerpo.

Es necesario aclarar que, en el caso de estudio de este trabajo, se hace una descripción detallada de todos los órganos dañados por el proyectil durante su trayecto. En esta descripción plasmada en el dictamen de medicina forense, se aprecia que el proyectil no atraviesa ningún tejido duro (*i.e.* hueso), sino únicamente tejidos blandos de la cavidad torácica. Se hace hincapié en esto debido a que en las imágenes obtenidas con el *Anatomage Table* se ha ubicado el punto de referencia en una posición que simula que está pasando a través de la columna vertebral (tejido duro), ya que por las características del software del *Anatomage Table*, al momento, no es posible establecer manualmente el trayecto deseado con el fin de realizar una simulación o animación eligiendo específicamente qué órganos atravesará el proyectil y qué cambios de posición adoptará de acuerdo a los efectos de penetración que presente durante el trayecto, ver figuras 18, 19 y 20.

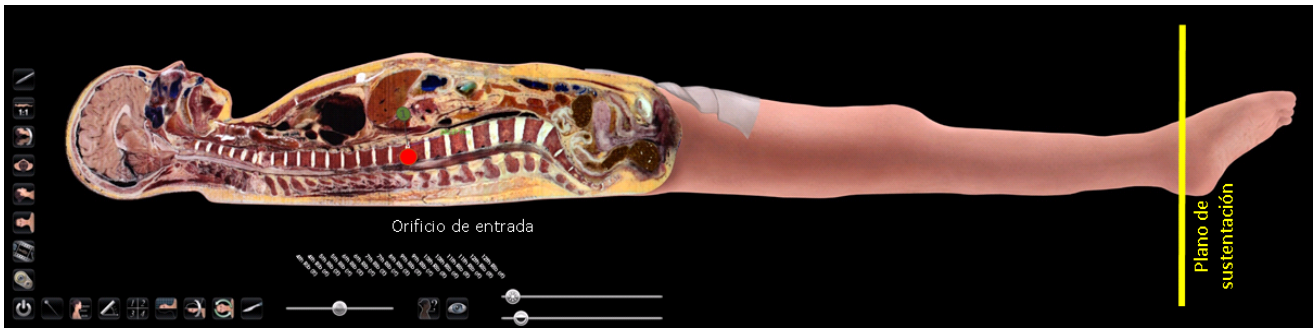


Figura 18. Captura de pantalla del maniquí biológico en posición de decúbito dorsal, visto desde el lado derecho. Como se mostró en la ilustración anterior, se realizó nuevamente un corte longitudinal, pero en esta imagen la profundidad del corte es mayor, debido a que se encuentra en la línea media.

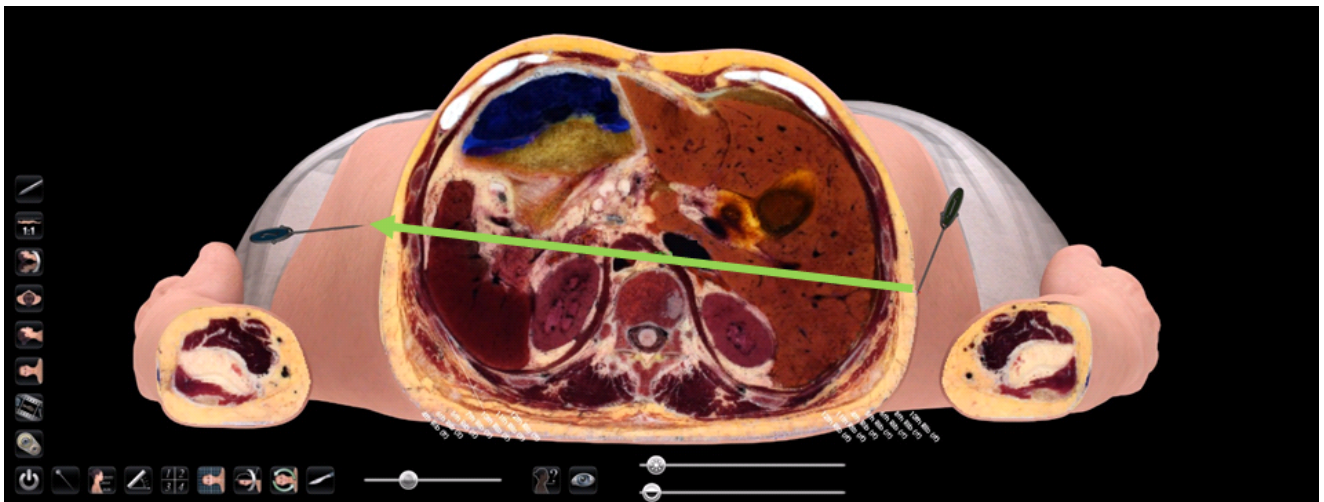


Figura 19. Captura de pantalla del maniquí biológico en posición bípeda, captado desde un ángulo cenital. Presenta un corte transversal a la altura del orificio de entrada (a 117 cm del plano de sustentación). Se muestra con una flecha verde la dirección de desplazamiento del proyectil en el interior del cuerpo, mas no muestra el trayecto exacto.

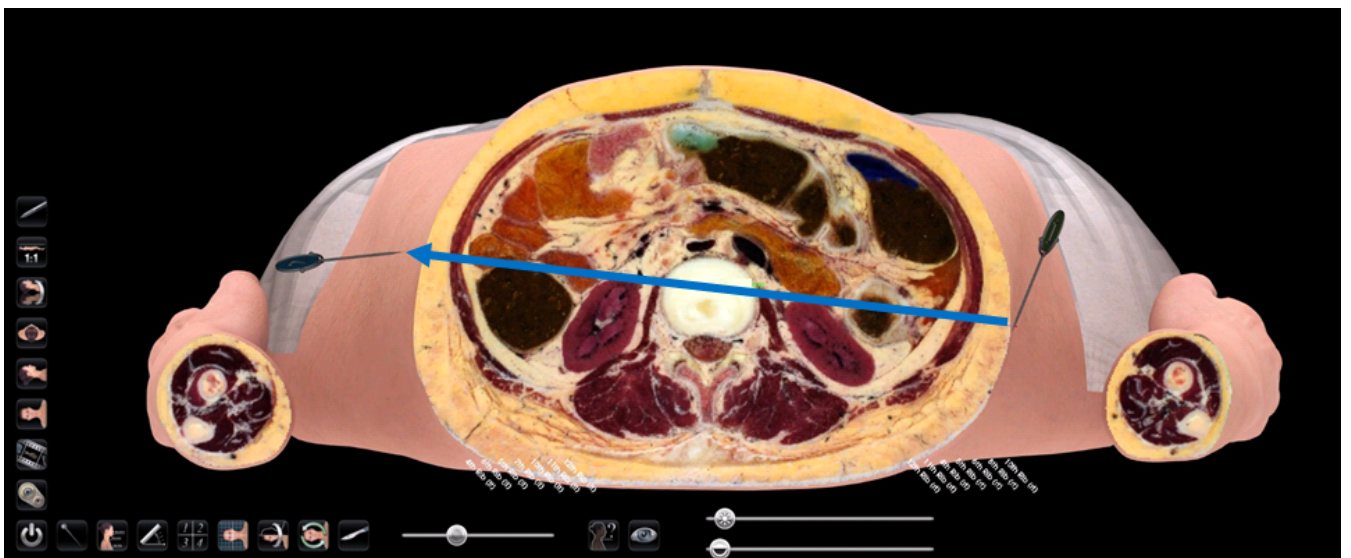


Figura 20. Captura de pantalla del maniquí biológico en posición bípeda, desde el ángulo cenital. Se muestra con una flecha azul la dirección de desplazamiento del proyectil en el interior del cuerpo, mas no muestra el trayecto exacto.

La figura 19 presenta un corte transversal a la altura del punto de alojamiento del proyectil (a 108 cm del plano de sustentación). Una flecha de color verde indica la dirección del desplazamiento del proyectil, pero al igual que en la figura 20, no muestra el trayecto que recorrió ni los tejidos específicos que dañó a su paso.

En trabajos futuros, la integración de herramientas visuales y la información balística deberán mostrar animaciones de trayectos y el daño en los tejidos; al momento, tal tarea está fuera de los objetivos de esta tesis. Para concluir esta sección, las imágenes del *Anatome-table* son útiles para estimar la longitud del trayecto, más aún, en este caso que los tejidos perforados fueron de diversas características: algunos de densidad baja como la sangre y otros de densidad alta como los músculos. Así, para estudiar la máxima penetración de la bala, lo más conveniente es estudiar un modelo homogéneo de alta densidad uniforme en lugar de uno heterogéneo de densidad promedio inferior al modelo propuesto. En las siguientes secciones comentaré sobre la construcción del modelo mediante gel.

Hasta este punto, se han tratado temas relacionados con la balística y sus efectos, centrando la exposición en el caso motivador de la tesis. Ahora, se expondrán algunos conceptos clave de instalaciones, instrumentos y materiales para realizar mediciones controladas en balística.

1.4 POLÍGONOS DE TIRO

Con la invención de la pólvora, ocurrió una revolución con las armas y las prácticas de tiro. Así, durante los siglos XIII y XIV se fundaron numerosos clubes y polígonos de tiro en las ciudades europeas. Hoy en día, se conoce bajo el nombre de *polígono de tiro* a aquellos espacios habilitados para el desarrollo de prácticas que involucran armas de fuego. Es un espacio delimitado, señalizado y reúne una serie de características reguladas por diversas entidades de seguridad pública dependiendo de cada país. Suelen utilizarse para el desarrollo de prácticas deportivas, pero también pueden ser espacios de uso recreativo y para el desarrollo de investigaciones en balística. Estos lugares se han vuelto de gran importancia forense, debido a que cada vez es más común investigar algún hecho delictivo que involucre un arma de fuego, por será necesario realizar pruebas balísticas para comprobar las hipótesis planteadas y de este modo, esclarecer los hechos ocurridos.

1.4.1 PRECAUCIONES DENTRO DE UN POLÍGONO DE TIRO

Al igual que en un laboratorio o cualquier otro espacio en el que se ejecuten experimentos, un polígono de tiro es un área en la que deben respetarse una serie de precauciones para evitar accidentes mediante la disminución de los factores de peligro. Según la norma ISO 45001, un peligro es una fuente, situación o acto con potencial para causar daño humano, deterioro de la salud, daños físicos o una combinación de estos.

Para preservar la seguridad, siempre que nos encontremos en contacto con un arma de fuego, deben seguirse cuatro normas básicas de seguridad que maximizarán la seguridad tanto del operador del arma, como del resto de los presentes:

- 1.- Todas las armas deben manipularse como si estuvieran cargadas, a pesar de saber que no lo están. Realizar siempre una verificación táctica o mecánica de la recámara.
- 2.- No apuntar directamente a nada que no se le pretenda disparar. Jamás apuntar a una persona.
- 3.- Mantener el dedo índice fuera del arco del guardamonte hasta el momento que las miras del arco estén alineadas con el blanco y se esté seguro de efectuar el disparo.
- 4.- Asegurarse del blanco y de los objetos detrás de éste. Nunca debe dispararse a un ruido o una sombra.

Sin importar a qué institución pertenece el protocolo aplicado en cada polígono de tiro, siempre debemos apegarnos a estas indicaciones, pues el objetivo de que estos protocolos existan, siempre será la protección y el bienestar de las personas.

1.4.2 ACONDICIONAMIENTO DE SEGURIDAD

Para que una instalación de tiro sea segura, deben integrarse distintas condiciones que refuercen la operatividad en el espacio. Algunas de estas condiciones son:

- **Iluminación específica:** debe instalarse en el techo y requiere protección contra impactos. Generalmente, se compone de tubos fluorescentes o pantallas de LEDS con reguladores de intensidad.
- **Sistemas de ventilación:** el plomo en suspensión es una de las sustancias más dañinas para la salud que se producen en un disparo, por lo que se requiere un ventilador de impulsión y un extractor, para que ocurra una correcta evacuación de gases.
- **Blancos fijos y portátiles:** algunos ejemplos de blancos móviles son el TM-300 (carro desplazable) y el blanco tipo carrusel. Para efectos de esta tesis, el único blanco utilizado fue el gel balístico.

El revestimiento de estos espacios es otra característica que debe mantenerse por seguridad en cualquier escenario; siendo uno de los principales, la loseta de caucho. Este revestimiento de función *anti-rebotes* tanto en techos como en paredes; es una plancha de alta densidad, ligada con poliuretano para lograr una compresión que no permita a los proyectiles rebotar.

1.5 GELES BALÍSTICOS

Los geles balísticos son materiales blandos, deformables irreversiblemente en su régimen plástico y preparados a partir de soluciones de agua con 10% ó 20% en masa de gelatina, y que, a temperaturas de 4 y 10 °C respectivamente, conservan adecuadamente sus características. Por lo general, son más utilizados para estudiar fenómenos de balística terminal, pues estas sustancias tienen similitudes con los tejidos blandos humanos, motivo por el que son denominados "maniqués". Su preparación no requiere equipo sofisticado o materiales de difícil acceso; es económico y lo más importante, no produce ningún tipo de residuo biológico infeccioso que pueda poner en riesgo la salud del experimentador o del ambiente en el que se encuentre durante su uso y su manejo.

También es común utilizar jabones de glicerina para este tipo de experimentaciones, pero el simulador más utilizado sigue siendo el gel balístico, a pesar de que en la literatura especializada no se encontró un acuerdo sobre la concentración ideal de gelatina, ni un método estandarizado para su preparación.

Una limitante en este tipo de experimentación, es que los geles no cuentan con una capa superficial que simula los efectos que sufre la piel humana, por lo que algunos investigadores han eliminado la piel de cadáveres humanos y la han probado de forma aislada. El primero en investigar la penetrabilidad de la piel humana fue Journée en el año 1907. Tras una serie de experimentos informó que una esfera de plomo de 11.25 mm de diámetro y un peso de 8.5 g, viajando a una velocidad inicial aproximada a los 60 m/s produjo daños superficiales en la piel sin penetración y que a 70 m/s perforó la piel y penetró varios centímetros en el tejido subyacente. Un inconveniente en este experimento, es que no se cuentan con registros de la ubicación o región anatómica en la que se efectuaron los disparos de prueba en el cadáver.

Actualmente, varios investigadores concuerdan en que la penetrabilidad de la piel depende principalmente de la densidad seccional S del proyectil ($S = \text{masa dividida por el área de la sección transversal de la bala en g/cm}^2$). Sin embargo, otro parámetro cuestionable además de la piel, es el daño producido en la gelatina con respecto a áreas específicas de tejido vivo, pues de acuerdo a la densidad del tejido penetrado, serán los efectos.

1.5.1 EJEMPLO DEL DESARROLLO DE PRUEBAS MEDIANTE EL USO DE GELES BALÍSTICOS

En la Universidad de Cranfield, Inglaterra, se realizaron pruebas balísticas colocando objetivos (geles balísticos) a 10 m de distancia de la boca del cañón de un arma Luger 9 mm y un arma Remington .223. Se realizaron diez disparos con cada munición, utilizando un bloque de gelatina distinto para cada disparo con la munición Remington .223, mientras que se realizaron dos o tres rondas de disparos con la munición Luger de 9 mm en cada bloque de gelatina (asegurando que los tractos no se superpusieran).

Para esta prueba se utilizó una cámara de video de alta velocidad *Phantom V12* y un radar Doppler Weibel W-700 para registrar la velocidad de los proyectiles y el *Software Phantom* para el análisis posterior de las imágenes captadas a través de la conversión de píxeles de cada imagen a una dimensión milimétrica. Así, se obtuvieron medidas tanto del diámetro de la cavidad temporal (en el punto en el cual alcanzó su mayor tamaño) y la distancia recorrida por el proyectil en el interior del bloque de gelatina. Después, se realizaron cortes longitudinales en los geles previamente disecados, utilizando un cuchillo. Esta técnica permitió observar restos de plomo presentes en las cavidades, mismos que fueron registrados fotográficamente, recolectados y debidamente embalados para su posterior análisis de laboratorio. Por último, se midieron las cavidades permanentes producidas en los bloques de gelatina, así como el volumen máximo del daño creado por la cavidad permanente. Los proyectiles utilizados perforaron los bloques de gelatina, independientemente de la concentración. El tracto dejado por los proyectiles tenía forma helicoidal y como resultado, el daño permanente de la cavidad solo se evaluó midiendo el área de la fisura que estaba presente.

Para el desarrollo de esta investigación, se elaboraron geles balísticos a base de grenetina. El resultado fue costo-efectivo pues presentaba las características adecuadas para la prueba, pese a no ser un material de transparencia absoluta.

1.6 USO DE LA CÁMARA FOTOGRÁFICA Y DE VIDEO

Se conoce como “cámara fotográfica” a un dispositivo que permite el paso de la luz a un tiempo preciso para que la imagen enfocada a través del objetivo sea registrada por un sensor digital o película. Se fundamenta en el principio de la cámara oscura, porque consta de un cuerpo de cámara y de un objetivo por donde penetran los rayos de luz. La cámara oscura consistía en una habitación hermética al paso de luz y que en el siglo XVII evolucionó a un instrumento portátil: una caja hecha de madera. La imagen final que es registrada por el sensor adquiere el nombre de “fotografía”, que es un *trozo de tiempo que queda inmortalizado en un medio tangible* [25].

1.6.1 EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAFÍA A TRAVÉS DE LOS AÑOS

En el año 1826, el francés Joseph Nicéphore Niépce logra obtener una imagen permanente a través de una cámara oscura y una placa de peltre con un recubrimiento sintético. Niépce consigue grabar una imagen de su finca bajo el título de *Vista desde la ventana de Le Grass* mediante una técnica a la que llamó “heliografía” que significa “dibujo solar” después de aproximadamente 8 horas de exposición a la luz. En esta época aún no era posible capturar los colores de una imagen, por lo que después de este acontecimiento, rápidamente se desarrollaron nuevas herramientas que le permiten mejorar la calidad de las imágenes capturadas, siendo en el año 1861 cuando el físico escocés James Clerk Maxwell crea una imagen que capta el color de los objetos utilizando tres filtros: rojo, verde y azul.

Posteriormente, el fotógrafo estadounidense Eadweard Muybridge comenzó a utilizar nuevas emulsiones que le permiten tomar secuencias de fotografías de animales y humanos en movimiento mediante una serie de imágenes “de acción” prácticamente instantáneas. Esto despertó el interés por desarrollar estudios avanzados de las cámaras fotográficas debido al descubrimiento de su gran potencial para capturar no sólo imágenes estáticas, sino también acciones dinámicas, siendo así el inicio de la cinematografía.

Fotografía de alta velocidad

La fotografía de alta velocidad se utiliza para “congelar” un momento en el que un objeto viaja a una velocidad tal, que es imposible apreciar a través del ojo humano. Esto es debido a que las imágenes captadas por una cámara ultra rápida, se refieren a una cantidad determinada de cuadros por segundo (*frames per second - fps*) que es más grande de la habitual para una videocámara convencional. Aproximadamente en 1850, por primera vez, se logran registrar imágenes a alta velocidad, cuando William Fox Talbot, un miembro del parlamento inglés, consigue captar una imagen clara y con un buen enfoque de un fragmento de periódico que giraba en una rueda mediante dos métodos en los que la única variable entre ellos, era el uso de un flash.

Este instrumento hizo que los tiempos de obturación de ambas fotografías fueran variables y por lo tanto, la claridad y la nitidez de las fotografías, también. En las figuras 21 y 22 se evidencia cómo la lámpara de un flash puede marcar una diferencia en la calidad de las imágenes obtenidas.

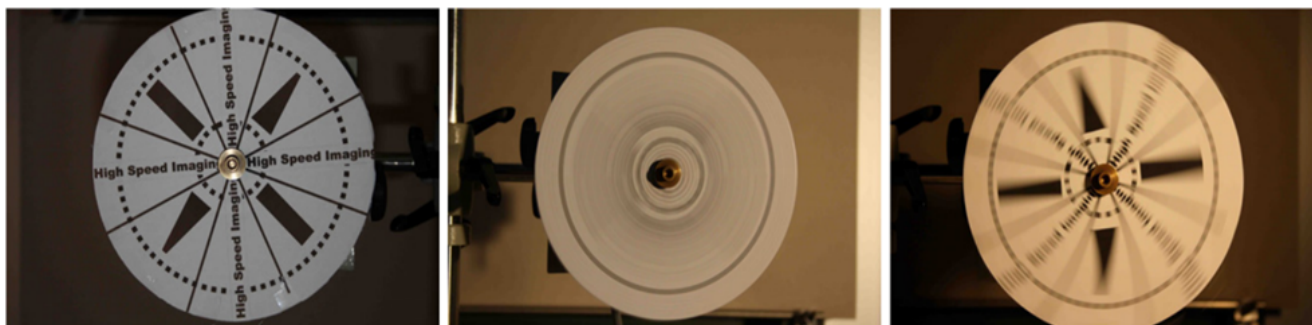


Figura 21. Primer experimento fotográfico de alta velocidad: se adjunta un papel impreso a un disco, que se monta en un taladro eléctrico con velocidades de cuadros de 1000 fps (izquierda), 2000 fps (centro) y 4000 fps (derecha) [26]



Figura 22. Experimento fotográfico de alta velocidad, usando una cámara moderna de alta velocidad (iluminación continua) con velocidades de cuadros de 1000 fps (izquierda), 2000 fps (centro) y 4000 fps (derecha). [26]

Desde entonces, se han modificado distintos elementos con el objetivo de incrementar la calidad de las imágenes captadas. Una de las principales contribuciones fue la inclusión de espejos o prismas giratorios, que regulan la iluminación. Los sensores de carga acoplada (CCD) también comenzaron a adquirir mayor popularidad debido a su uso a través de un control electrónico del tiempo de integración y a su alta resolución espacial (gran número de píxeles), factores que provocaron la eliminación del uso de las persianas mecánicas.

En la década de 1940 el Dr. Harold Eugene Edgerton, obtiene las primeras imágenes fotográficas de alta velocidad, colaborando con *National Geographic* para perfeccionar distintas técnicas fotográficas hasta lograr “congelar” movimientos rápidos que ocurren en la naturaleza, ver figura 23.

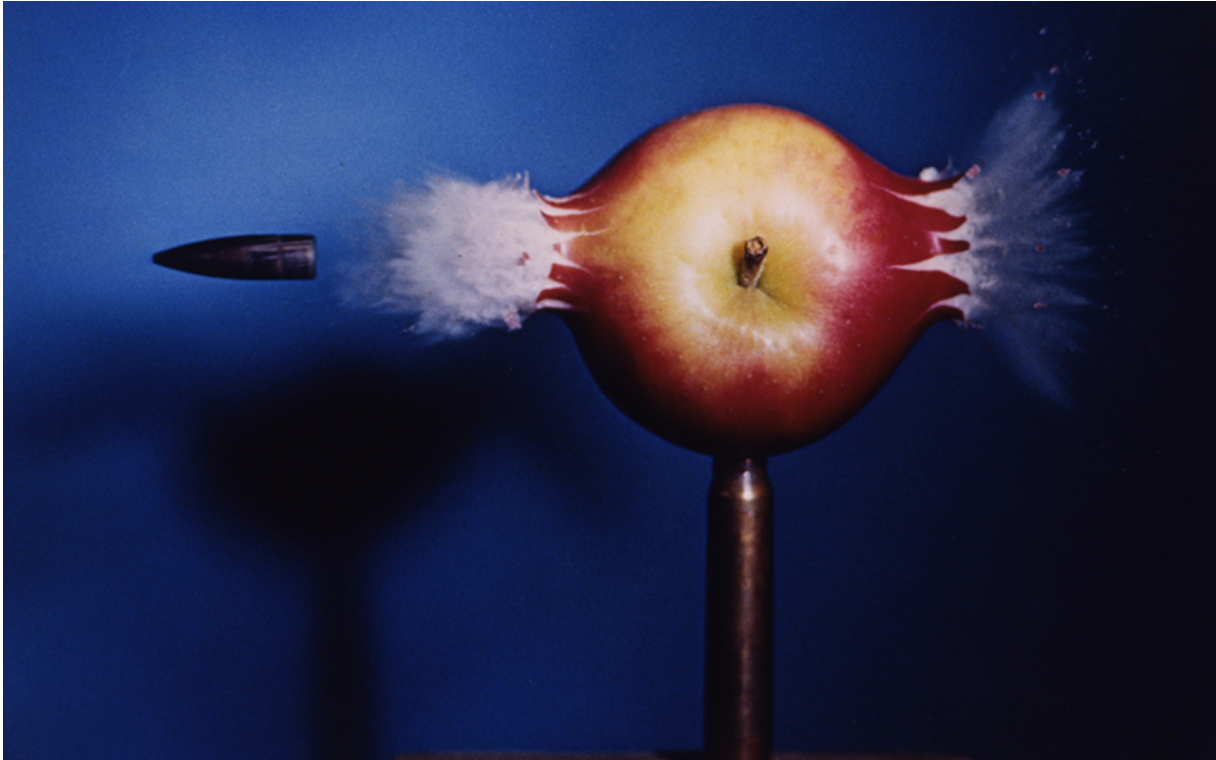


Figura 23. Fotografía de una bala atravesando una manzana por Harold E. Edgerton, Museo Smithsonian de Arte Americano.

1.6.2 SISTEMAS DE LAS CÁMARAS DE ALTA VELOCIDAD

La tecnología de detección es un elemento del que dependen muchas propiedades de los equipos y pueden clasificarse como de alta, media o baja gama. Otros aspectos influyentes al utilizar cámaras de alta velocidad, son la relación que existe entre la velocidad de cuadros y el tiempo de integración, el manejo de datos del equipo, el disparo de la cámara y la iluminación de los objetos a captarse. A continuación, se especificarán estas características:

(a) Velocidad de cuadros y tiempo de integración

A grandes rasgos, la manera en la que se genera la señal en una cámara ultra rápida ocurre de la siguiente forma: la radiación incidente se enfoca en un píxel detector, donde se produce una fotocorriente; este flujo electrónico carga un condensador una vez que se cierra un interruptor. La señal corresponde a la carga en el condensador que se registra utilizando un circuito integrado de lectura (ROIC) [26]. Así entonces, la velocidad de cuadro determinará con qué frecuencia el ROIC lee el capacitor. El tiempo de integración se refiere al tiempo en el que el interruptor se cierra (controlado electrónicamente) y representa la velocidad de los fotogramas.

La mayoría de las cámaras cuentan con un tiempo de integración determinado que permite el ajuste adecuado del brillo de la imagen. En la actualidad, las velocidades máximas de transferencia de datos limitan el tiempo de grabación posible para una alta resolución espacial.

(b) Tamaño de la memoria, tiempo de grabación y número de píxeles

El tiempo de grabación (tRec) suele estar predeterminado, pues depende del tamaño de la memoria (MEM)

c) Tasas de transferencia de datos y manejo de datos.

La velocidad de transferencia de datos desde los detectores al chip de memoria, representan una de las limitaciones técnicas más importantes en el uso de las cámaras de alta velocidad. Requiere de dos etapas:

1. Transferencia rápida: almacenamiento rápido al chip de memoria dentro de la cámara.
2. Transporte al disco duro: transferencia lenta de datos a la computadora que controla la cámara (disco duro externo).

d) Disparo.

Es necesario presionar el botón disparador de forma mecánica o electrónica para iniciar el almacenamiento de las imágenes.

1.6.3 USO DE LA CÁMARA ULTRA RÁPIDA EN ESTUDIOS BALÍSTICOS

La fotografía de alta velocidad se usa como técnica de medición que permite el estudio de los proyectiles durante su movimiento, ya sea durante la trayectoria o trayecto. Conforme se modifica la velocidad de un proyectil, el tiempo de exposición cambia también, ya que a mayor velocidad, menor será el tiempo de exposición; por ende, la cantidad de luz que ilumine el objeto deberá ser mayor si se desea conservar la calidad de una imagen.

Las cámaras ultra rápidas pueden utilizarse para el registro de movimientos balísticos gracias a que su diseño permite captar el vuelo de proyectiles y adaptarse a su ubicación durante su desplazamiento. Este tipo de cámara cuenta con un CCD de alta resolución capaz de registrar una imagen de cortas exposiciones únicas o múltiples de hasta 200 ns, garantizando imágenes nítidas de alta resolución a pesar de que un proyectil abandone el arma de fuego a una velocidad promedio de 360 km/h. Esta técnica de fotografía requiere fuentes de iluminación potentes, que se adecuen a eventos de corta duración, pues a medida que la cámara capta una nueva fuente de luz lineal debido a que un proyectil entra en el campo de visión, ocurrirán modificaciones en la intensidad de la luz que están relacionados con la posición (x, y) del proyectil. A continuación, se mencionarán algunos requisitos para lograr una buena iluminación:

- **Luz del sol / luz del día:** algunas cámaras brindan la posibilidad de obtener velocidades de encuadre de hasta 10–20,000 fps. Su desventaja es que no está completamente bajo el control del fotógrafo.
- **Tubos de flash electrónicos:** se utilizan en fotografía balística porque su duración es variable a medida que disminuye el tiempo de exposición. Además, puede sincronizarse con diversos tipos de cámara, logrando que el flash parpadee durante el período en que el obturador está abierto.

- **Rayos X:** es una fuente de iluminación óptima debido a su capacidad única de penetrar objetos normalmente opacos. Los electrones bombardean el ánodo del tubo y producen un haz de rayos X que se emite desde la parte frontal del tubo. Entre mayor sea el voltaje de funcionamiento, más energéticos o penetrantes serán los rayos X.

Tabla 4. *Tipos de iluminación para fotografía ultra rápida.* [27]

Fuente	Duración en segundos
Lámparas de flash	$0.5 - 5 \times 10^{-3}$
Flash electrónico	$10^{-3} - 10^{-6}$
Flash de rayos X	$10^{-7} - 10^{-9}$
Fuentes de luz radiante	10^{-12}

Cuando se requiere fotografiar un proyectil durante su vuelo, se debe obtener una vista desde uno de los lados; por lo que se recomienda utilizar un lente gran angular para obtener exposiciones cortas que garanticen calidad en el enfoque. También es necesario obtener gran precisión en la sincronización del equipo, para asegurar que el proyectil esté dentro del campo de visión de la cámara al momento del registro.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se expusieron fundamentos y conceptos clave de la balística, en particular, de efectos concernientes a la investigación realizada. Se presentaron las características esenciales de técnicas y medios para realizar mediciones controladas de efectos balísticos en maniqués deformables de modo irreversible (*i.e* plásticos). Se exponen los elementos principales del caso motivador de este trabajo y, mediante la herramienta *Anatmage table*, se obtuvieron vistas del trayecto de una bala atravesando tejido blando. En las secciones últimas se mostraron generalizaciones sobre instalaciones e instrumentos para realizar pruebas y mediciones balísticas de precisión. A continuación, se describirá el modelo balístico que da cuenta de la dinámica que produjo el trayecto ocurrido en el caso de estudio.

CAPÍTULO 2.

MODELOS BALÍSTICOS

La balística de heridas es en gran parte una ciencia empírica, siendo su base de trabajo la observación detallada que aspira al control de variables para realizar experimentos. Así, es de esperar obtener reproducibilidad entre disparos y mediciones para inferir información relevante y alcanzar conclusiones bien fundamentadas, pero los buenos experimentos suelen guiarse mediante buenos modelos teóricos. En este capítulo se presenta un modelo físico-matemático para el caso motivador de esta tesis. Se inicia argumentando a favor de la construcción del modelo y se concluye mostrando una función que relaciona la máxima penetración en un material plástico que puede alcanzar una bala con una velocidad de impacto conocida.

2.1 PENETRACIÓN

El fenómeno de penetración de los proyectiles es atractivo para realizar diversos análisis y estudios científicos, pues es posible encontrar en proyectiles de alta velocidad deformaciones y transferencia de energía cinética al objeto impactado.

De acuerdo con diversos autores, las heridas provocadas por proyectiles de arma de fuego suelen clasificarse en dos grandes categorías: heridas perforantes y heridas penetrantes [28]. Las heridas perforantes son aquellas en las que el proyectil atraviesa al objeto impactado, mientras que las heridas penetrantes ocurren cuando el proyectil entra en un objeto u organismo y permanece en el interior del mismo. Un proyectil penetrante causará únicamente un orificio de entrada por lo que la energía cinética del proyectil es liberada en los tejidos circunvecinos, a diferencia de una herida perforante en la que existirá un orificio de salida, de modo que una parte de la energía cinética del proyectil se libera en el interior de los tejidos atravesados. Para efectos de este trabajo, el enfoque de investigación se centra únicamente en las heridas de tipo penetrante.

2.1.1 MECANISMOS DE PENETRACIÓN

La mayoría de los proyectiles están compuestos por un núcleo de plomo y una camisa exterior de latón (por lo general, 70% cobre y 30% zinc), representados en la figura 24. Gracias a esta composición es común encontrar que varios fabricantes opten por unir el núcleo a la camisa o bien, agreguen un anillo interno para conectar de forma mecánica las estructuras antes mencionadas y así evitar la disminución en la velocidad durante su trayectoria.

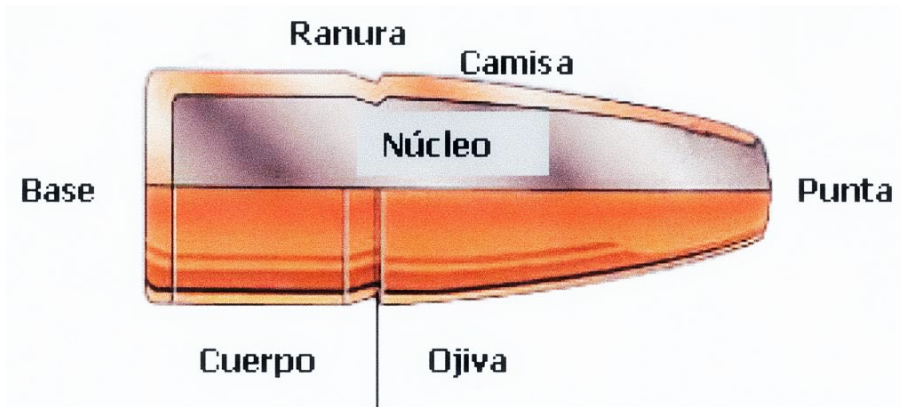


Figura 24. Diagrama de los compuestos básicos de un proyectil. [11]

En el trauma de penetración la mayoría de los tejidos no sobreviven, pero esto dependerá de la elasticidad y la cohesión del tejido traumatizado. Por ejemplo, el músculo estriado esquelético o los pulmones son tejidos altamente tolerantes, mientras que los tejidos menos elásticos y cohesivos como el hígado, no soportan traumas contundentes.

2.1.2 POTENCIAL DE HERIDA

Se conoce como “potencial de herida” a la disrupción o daño sufrido por un tejido como consecuencia del paso de un proyectil [29]. La magnitud de estas alteraciones dependerá de las siguientes propiedades:

- **Masa del proyectil:** este factor es una parte fundamental del diseño de una bala, pues entre mayor sea su masa, causará una expansión más lenta y una mayor penetración que permitirá el paso del proyectil a través de uno o varios tejidos.
- **Velocidad que alcanza el proyectil:** la mayoría de los proyectiles se diseñan con el objetivo de que cedan de manera efectiva su energía cinética al alcanzar velocidades entre 600 y 850 m/s. Cuando la velocidad de un proyectil es menor a tal intervalo, su efectividad será insignificante; mientras que si la velocidad excede dicho intervalo, existe la posibilidad de que la bala, en vez de penetrar el tejido, únicamente cause heridas superficiales como al sufrir un fenómeno de fragmentación. Es importante mencionar que en diversos sistemas de clasificación de heridas por proyectil de arma de fuego basados en la cantidad de energía cinética, únicamente consideran la velocidad que alcanza el proyectil, pero suelen omitir el resto de los factores involucrados. Por ejemplo, que la profundidad de penetración es directamente proporcional a la masa y la velocidad, y la relación inversamente proporcional con el diámetro de la bala.

- **Densidad seccional:** esta propiedad hace referencia al resultado del peso del proyectil dividido por el cuadrado del calibre del proyectil [10]. Dependiendo de qué tan grande sea el valor de la densidad seccional, será la profundidad de penetración del proyectil. La densidad seccional es esencial en las características aerodinámicas de una bala. El **coeficiente balístico (C)** es igual a la densidad seccional (**DS**) dividida por un coeficiente (**F**), conocido como coeficiente de forma (**C = DS / F**). Lo que significa que entre mayor densidad seccional posea una bala, su coeficiente balístico será mayor que su trayecto debido a que la forma en la que cederá su energía será gradual.
- **Propiedades físicas del tejido:** existen diversas teorías que sostienen que a mayor densidad de un tejido, menor será la penetración del proyectil porque habrá una mayor resistencia que frenará la energía con la que éste viaja al interior del cuerpo. Esto quiere decir que, de acuerdo a la densidad que posea un tejido, será posible la penetración del proyectil en una o más estructuras biológicas a la vez.

2.1.3 PENETRACIÓN EN LA PIEL Y EN EL CUERPO HUMANO

Cuando un proyectil atraviesa más de una capa de tejido suele desviarse al avanzar, dificultando penetrar una siguiente capa, por lo que únicamente continúa deslizándose en el tejido de interfaz hasta que se frena por completo [30].

Aunque diversos autores afirman que el mínimo de velocidad de perforación de la piel humana por una bala es de 60 m/s, sigue siendo un tema abierto al debate. Un claro ejemplo de este conflicto lo encontramos en los estudios más recientes de los fabricantes de armas y municiones de la marca *Sellier & Bellot*, en donde argumentan que esta velocidad “límite” no es una constante, sino que varía para cada proyectil dependiendo de la densidad seccional y, por lo tanto, de la energía cinética. Además, este estudio sostiene lo absurdo de establecer una velocidad estándar debido a que la forma de la punta o nariz de las balas es otro factor significativo. Por ejemplo, en igualdad de condiciones, una bala redonda (*round nose* - RN) penetrará de forma diferente que una bala que posee una punta plana o en sacabocado (*wadcutter* - WC).

A pesar de que no se han obtenido resultados de alta precisión sobre penetración en tejidos blandos humanos, existen suficientes experimentaciones con tejidos de animales con resultados indicativos. De manera general, gracias a estos estudios se ha concluido que, para realizar cálculos en tejidos blandos de seres humanos, es necesario calcular el grosor de la piel y el grosor del tejido muscular, considerando la velocidad con la que el proyectil realmente comienza a penetrar.

2.2 COMPORTAMIENTO DE UNA BALA PENETRANTE

Las balas provenientes de pistolas suelen causar canales de heridas más pequeños que las balas proyectadas por un rifle al poseer una menor longitud y puntas de formas cónicas que resultan ser más contundentes (fenómeno ilustrado en la figura 25). La forma de estos proyectiles provocará que se presenten cambios insignificantes en la superficie de contacto en caso de que ocurran desviaciones, significando que la transferencia de energía varía poco a lo largo de la cavidad temporal.

Es común encontrar balas para arma de fuego cortas con recubrimiento o camisa de metal, conocido en inglés como *full metal jacket*. Estos proyectiles llegan a alcanzar una rapidez de hasta 700 m/s y tienen la característica de deformarse desde el momento en el que impactan alguna superficie. Estas deformaciones dependen de la velocidad y la profundidad de penetración tal como lo representa la figura 26; produciendo que el canal de la herida sea recto al inicio pero con un estrechamiento importante una vez que alcanzó su diámetro máximo.



Figura 25. Fotografía de balas que presentan deformaciones en la punta en función de la velocidad de impacto vs gelatina. De izquierda a derecha las velocidades fueron: 600, 630, 670, 690 y 710 m/s (bala 7.62 x 39) [29] p.102

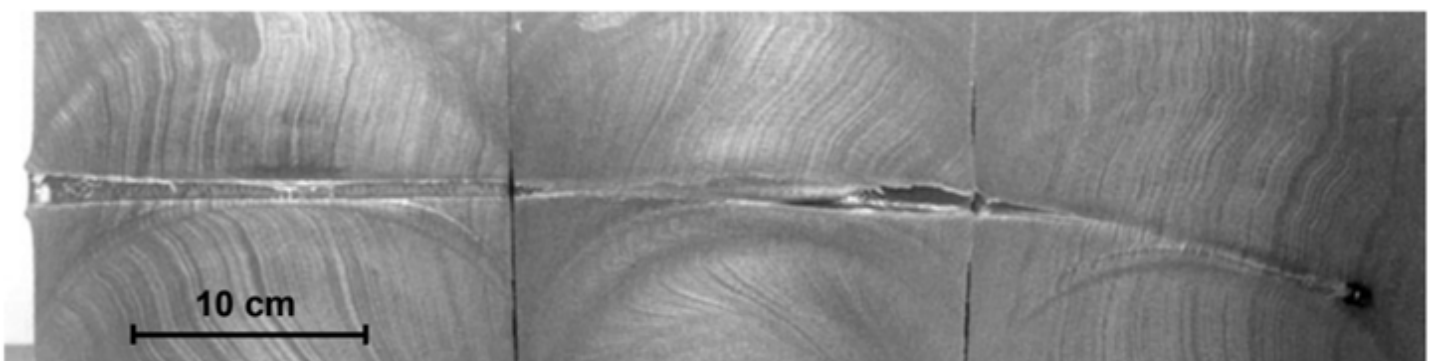


Figura 26. Fotografía del canal de herida de un proyectil de 9 mm *full metal jacket*, disparado por pistola Luger. Trayectoria de izquierda a derecha. [29] p. 104

2.2.1 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE PROYECTILES DISPARADOS POR PISTOLA

La profundidad de penetración se refiere a aquella distancia a la que se frenará por completo un proyectil tras haber impactado en un cuerpo u objeto. Esta distancia dependerá del movimiento de una bala a medida que comienza su desaceleración debido a las fuerzas de frenado actuantes sobre la misma. En relación con los proyectiles disparados por pistolas, la profundidad de penetración y la velocidad mínima que se requiere para que la penetración ocurra (como se mencionó en párrafos anteriores, en el caso de la piel humana, una rapidez aproximada de 60 m/s es suficiente para romper este órgano), son dos factores fundamentales para la balística de efectos.

Existe una relación directamente proporcional entre la densidad seccional del proyectil y el poder de penetración. Entonces, una buena penetración requiere una bala con un peso considerable y un área transversal pequeña. Estas características implican que los proyectiles deformantes no sean idóneos si el objetivo es una penetración profunda. Por ejemplo, los proyectiles con un núcleo de plomo o con una punta redonda de metal producirán canales largos y con diámetros de heridas pequeños, por lo que al ser su diana un área no vital, existe una alta probabilidad de supervivencia y el riesgo de lesión permanente es bajo. Otro ejemplo, son aquellas balas que cuentan con una punta hueca o una punta blanda (generalmente de plomo) diseñada para deformarse y adquirir una forma de “hongo”. Al aplanarse la bala, aumenta el área de superficie y por consiguiente, el diámetro del tejido lesionado también incrementa, haciendo que la profundidad de penetración se vuelva mucho menos. En nuestro caso, las balas 9mm no están diseñadas para deformarse fácilmente.

2.2.2 APLICACIÓN DE LA MECÁNICA EN EL ÁMBITO BALÍSTICO

La cinemática es una rama de la física que estudia los movimientos de los cuerpos en el espacio sin considerar las causas que los producen [31]. Su objetivo es describir la trayectoria que recorre un cuerpo dependiendo de su velocidad. Es decir, en función del valor vectorial que indica la distancia recorrida por unidad de tiempo, como se muestra a través de la tabla 5 y la tabla 6. Este parámetro se considera el más importante para una recreación o reconstrucción de hechos referente a la balística exterior, pero existen otros factores que producen perturbaciones durante la trayectoria, entre los principales se encuentran [31]:

- **Viento lateral:** puede desviar al proyectil de la trayectoria original en función al tiempo de vuelo y a la velocidad del viento. Por las condiciones del caso estudiado en esta tesis, el estudio de este factor no es parte de los objetivos de la presente tesis.
- **Lluvia:** es capaz de ralentizar un proyectil, aumentando su tiempo de vuelo, o puede desviar el proyectil ligeramente hacia abajo. Cuando se realizan disparos a largas distancias estos efectos se manifestarán haciendo que el impacto se encuentre ligeramente más abajo de lo que se encontraría ante la ausencia de esta perturbación. Al ser un factor externo al organismo impacto, tampoco es considerado en este trabajo de investigación.

- **Fuerza de la gravedad:** responsable de atraer al proyectil hacia el centro de la tierra, haciendo que la trayectoria sea una curva. El cual es un factor de importancia cuando la distancia es considerable. Sin embargo, si la velocidad es alta y la distancia es pequeña puede ser innecesario su incorporación al modelo [32]
- **Resistencia aerodinámica:** a esta perturbación se debe la pérdida progresiva de la energía cinética del proyectil. Suele complicar los estudios analíticos, debido a que la fuerza está en función de la velocidad, que por lo regular se modela como linealmente proporcional (para trayectoria) o cuadrática (para trayecto) al módulo de la velocidad. Para este trabajo, sí se consideran los efectos de resistencia de los tejidos contra el paso del proyectil en el trayecto.

Tabla 5. Velocidad angular ω , velocidad rotacional v y velocidad circunferencial v . [29]. p.6.

Tipo de proyectil	ω [rad/s]	v [1/s]	v [m/s]	v [ft/s]
Pistola (9 mm Luger)	8,800	1,400	40	130
Revolver (.44 Rem. Mag.)	5,440	866	30	100
Rifle (7.62 mm NATO)	17,100	2,721	67	220

Recapitulando, para el caso motivante del trabajo, solo son de importancia la resistencia del material contra la velocidad del proyectil. Pues al ser un trayecto de longitud corta el efecto gravitacional puede despreciarse, al igual que los fenómenos externos al cuerpo, como el viento.

A través de instrumentación de fotocpuertas, radares o cámaras de alta velocidad, es posible determinar la velocidad de un proyectil de forma precisa siempre y cuando, la frecuencia de muestreo utilizada sea relativamente alta, pues pequeños errores en la medición de la distancia y el tiempo producirán grandes errores en el resultado final.

Por otro lado, cuando sea necesario elegir un simulador o maniquí para realizar experimentos de balística de heridas, es fundamental determinar cuál es el propósito de la investigación. La estandarización para estas decisiones debe garantizar que en ambos medios (medio real y simulador) habrá un resultado aproximado de la profundidad de penetración si las condiciones del impacto son equivalentes. En la siguiente sección se abundará más sobre esta idea.

Tabla 6. *Velocidades típicas de proyectiles y ondas sonoras. [29], p.5.*

Objeto/Medio		Velocidad	
		[m/s]	[ft/s]
Proyectil	Pistola/rifle de aire	100 - 250	300 - 820
	Pistolas	250 - 400	820 - 1310
	Rifles	600 - 1000	1,970 - 3,280
	Fragmentos	<2,000	<6,560
Ondas sonoras	En aire (15°C)	340	1,115
	En agua (20°C)	1,483	4,865
	En acero	5,180	16,995
	En vidrio	5,225	17,142

2.3 SIMULADORES

Existe numerosa bibliografía sobre la posibilidad de lograr la equivalencia entre el músculo y un maniquí a base de gelatina al 10% a 4 °C. De este modo suele ser observado el comportamiento del material y de otros más utilizados como simuladores. En la figura 27, se ejemplifica la comparación de un trayecto en un medio de gelatina y uno de jabón de glicerina, mientras que en la figura 28 se muestra una media de las capacidades de penetración de acuerdo a las propiedades del medio impactado.

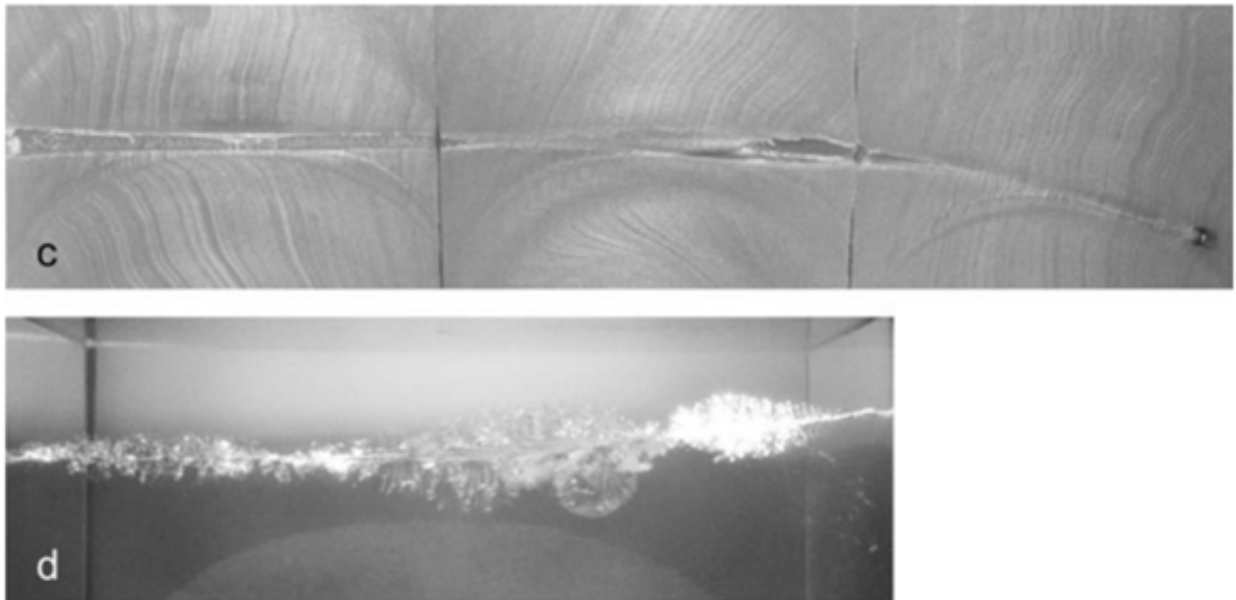


Figura 27. Fotografías comparativas entre jabón de glicerina (c) y gelatina (d); Luger 9 mm. [29] p. 149.

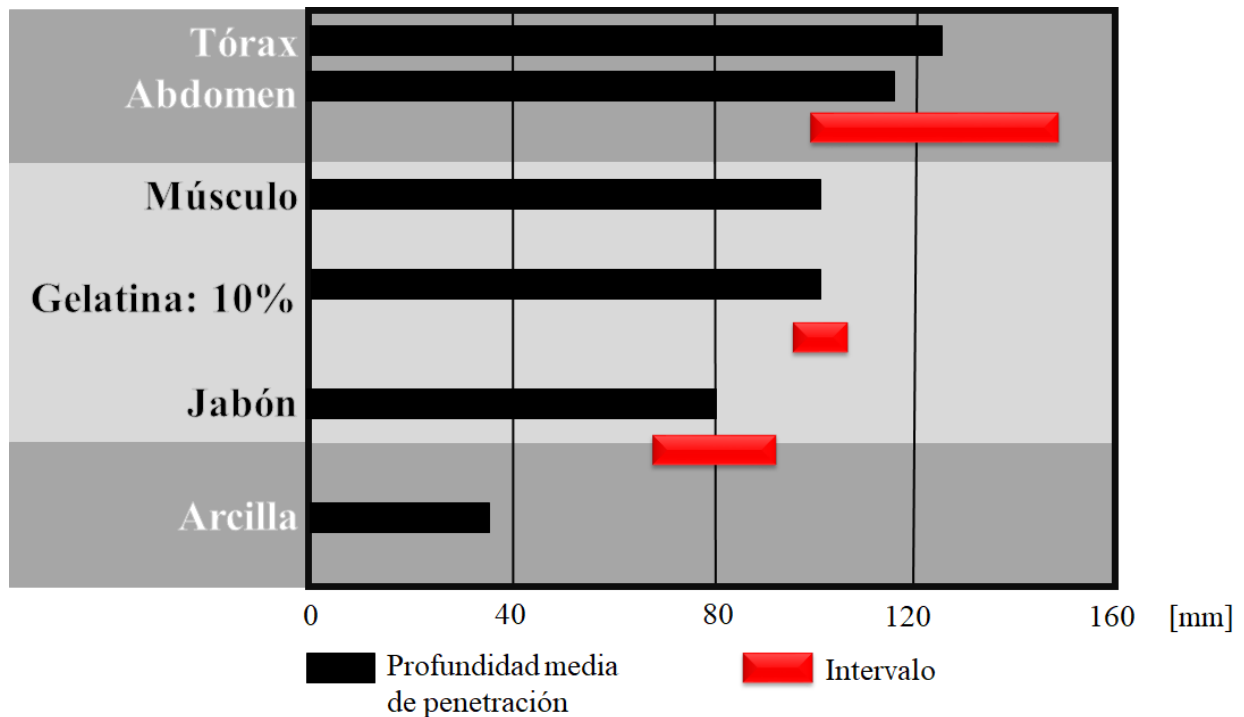


Figura 28. Comportamiento de diversos materiales respecto a la profundidad media de penetración. [29] p. 150. Nótese que los resultados en músculo y gelatina al 10% son prácticamente iguales.

A través del uso de diversos materiales se simula la reacción de algunas estructuras biológicas. Algunos de los materiales que suelen utilizarse de manera combinada para realizar una simulación de estructuras enteras son los polímeros, a través de los cuales se realizan reconstrucciones de las siguientes estructuras:

- **Piel:** debido a que la composición de la piel es distinta entre individuos por variables como el grosor y la elasticidad, resulta complicado obtener condiciones idénticas. Sin embargo, el uso de una capa de silicio junto con fibras sintéticas, simula de forma adecuada a este órgano [32]. También puede utilizarse gamuza sintética remojada en cera para realizar experimentos simples de este tipo. Aunque Jussilaa, J. *et al.* (*Ballistic skin simulant*, 2005) desarrollaron pruebas que mostraron que el mejor simulador de piel es la tapicería de piel de vaca con un espesor nominal de 0.9-1.1 mm, el cual es accesible fácilmente en el mercado.
- **Vasos sanguíneos:** se han realizado distintos experimentos utilizando tubos de plástico cerrados en ambos extremos, que llevan en su interior sangre falsa (generalmente hecha con agua, miel y colorantes vegetales) con el objetivo de generar una presión hidráulica similar a la presión que se encuentra en los vasos sanguíneos. Este tipo de soluciones son suficientes para fines demostrativos.

Por cuestiones éticas, se evita realizar estos estudios directamente con humanos, por lo que también se puede recurrir a utilizar animales. Si bien es cierto que cada animal tiene una anatomía y fisiología distinta, se obtienen resultados con una gran precisión al seleccionar aquellos con características compartidas con los humanos, como lo son los cerdos o los chimpancés, pues además de contar con una morfología similar a la humana, se obtienen canales de herida con una longitud suficiente para su análisis.

También se ha recurrido a cadáveres para realizar experimentos. Sin embargo, existen varios factores a considerar para que las condiciones sean lo más semejantes posibles a un ser humano vivo. Por ejemplo, es ideal utilizar cadáveres con un tiempo de muerte reciente y conservados a temperaturas alrededor de los 0°C con el objetivo de retardar los fenómenos cadavéricos, especialmente cuando el análisis se realiza sobre tejidos blandos como músculo o grasa, pero nuevamente, no se estaría realizando una prueba éticamente correcta.

Para los fines de esta tesis, el medio más efectivo, económico y bioético fue utilizar gelatina de alta densidad con el fin de extrapolar los datos a los casos extremos de tejidos humanos. Un material heterogéneo es más difícil de construir y analizar. La tabla 7 muestra la densidad de varios tejidos humanos, donde el promedio de las densidades mínimas es $1001.6 \pm 154.0 \text{ kg/m}^3$ (15% de error porcentual) y el promedio de las densidades máximas es $1087.9 \pm 138.6 \text{ kg/m}^3$ (13% de error porcentual). El objetivo es construir un maniquí representativo de estas densidades y realizar un estudio sistemático.

Tabla 7. Meta estudio de las densidades mínimas y máximas de algunos tejidos blandos. Ordenados alfabéticamente. Basada en [33]

Tejido	Densidad mínima (kg/m ³)	Densidad máxima (kg/m ³)
Bazo	1050	1163
Esófago	1040	1040
Estómago	1050	1126
Hígado	1050	1158
Intestino delgado	1030	1030
Intestino grueso	1044	1132
Lengua	1041	1178
Músculo cardiaco	1059	1143
Músculo esquelético	1041	1178
Páncreas	1045	1128
Pared de vasos sanguíneos	1056	1147
Piel	1100	1125
Pulmón inflado	455	604
Riñón	1019	1147
Sangre	1025	1060
Tejido graso	812	961
Tendones / ligamentos	1110	1174

Como complemento de la tabla 7, a continuación se muestra un esquema basado en la obra “*Sellier, 1982*”, en donde se ilustra el comportamiento de una bala calibre 6.35 mm disparada por una pistola marca Browning y al atravesar una estructura craneal. En el eje Y se observan los valores de la velocidad del proyectil, mientras que en eje X se encuentra la distancia recorrida por el proyectil durante su trayecto a través de diversas estructuras biológicas.

Por ser un calibre de arma de puño, el proyectil contiene pequeñas cantidades de pólvora, por lo que la velocidad alcanzada durante su vuelo, será menor en comparación con aquella de otros calibres convencionales. Se muestra que al momento en que la bala impacta contra la piel, su velocidad se encuentra alrededor de los 200 km/h. Posteriormente, al penetrar un tejido duro (hueso) existe un cambio brusco de la velocidad (v_e). Continuando su paso a través de los tejidos, nuevamente hay un descenso considerable en la velocidad cuando el proyectil ingresa nuevamente en un tejido blando (cerebro). Nótese que conforme avanza en el cerebro, la velocidad disminuye de modo monótono y suave pues se trata de un tejido blando. El objetivo de incluir este apoyo visual es únicamente ilustrar cómo se modifica la velocidad de una bala dependiendo de los cambios en los valores de densidad de las estructuras penetradas durante su paso.

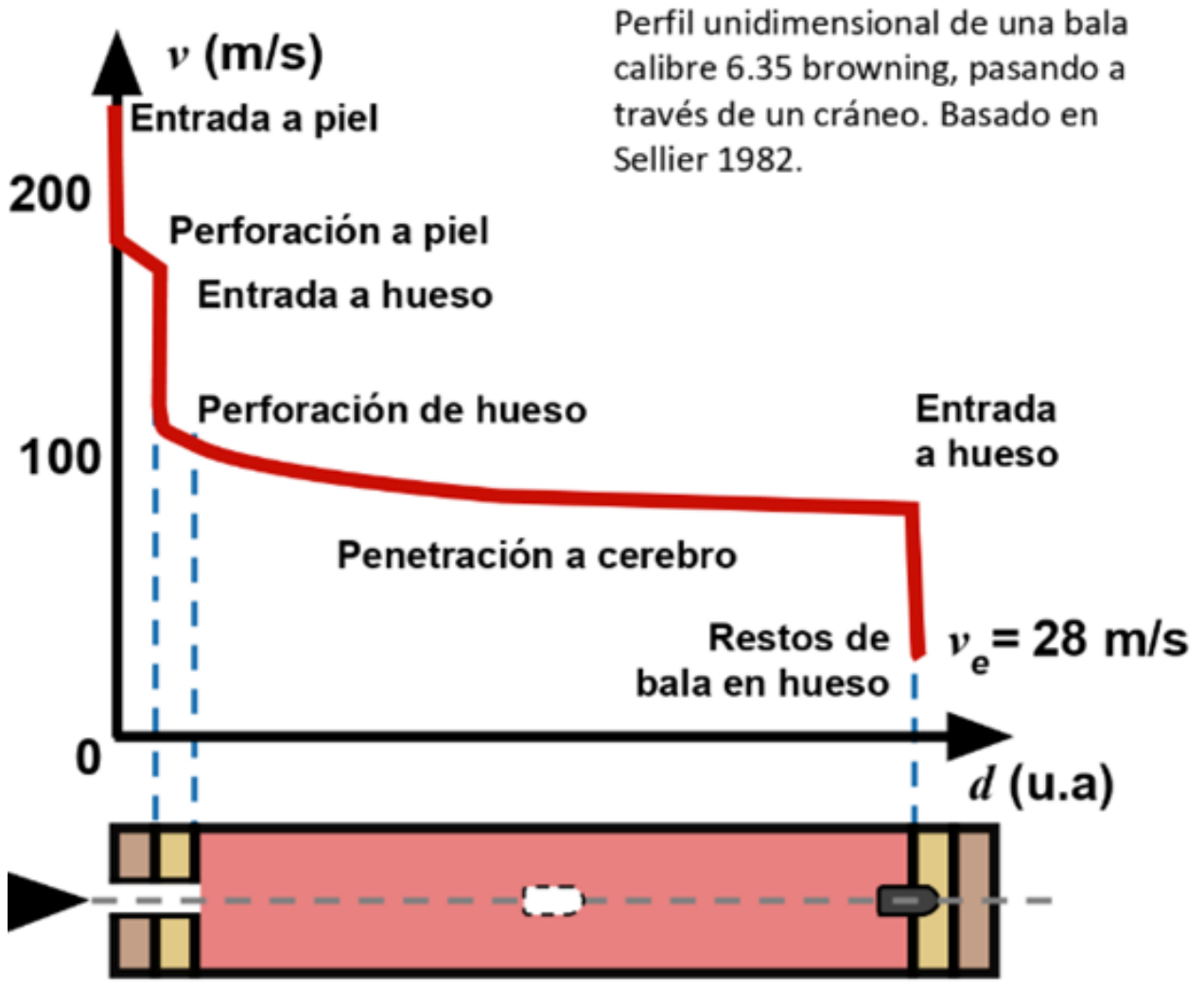


Figura 29. Esquema de disminución de la velocidad de una bala al atravesar varios tejidos (blandos y duros).

2.4 MODELOS TEÓRICOS DE BALÍSTICA TERMINAL

Al momento en que ocurre el impacto de una bala contra un cuerpo, ocurren distintos procesos como consecuencia de la transferencia de grandes cantidades de fuerza y presión, por lo que se presentan cambios y deformaciones en función de las características de los materiales que componen el proyectil y el blanco. Dependiendo de la rigidez del objeto impactado, la bala también sufrirá deformaciones en su estructura. A continuación, se mencionan algunos modelos balísticos populares que ilustran el desplazamiento que sufren los tejidos del cuerpo.

2.4.1 MODELO DE TAPONAMIENTO Y MODELO DE PÉTALO

El modelo de taponamiento se utiliza cuando el material estudiado presenta capas delgadas, por lo que *“la bala no causa una deformación en la superficie que impacta, sino que elimina las capas o discos”* [32]. Este modelo considera materiales rígidos pero también algunos materiales blandos en los que se puede producir un efecto de “tapón” que dificulte o impida el paso del proyectil a través del medio penetrado, generando cavidades amplias durante el trayecto. Este tipo de lesiones tisulares suele presentarse cuando el proyectil disparado presenta una punta plana que requiere grandes aplicaciones de presión para romper el tejido.

También nos encontramos el modelo de pétalo, que como su nombre lo indica, ocurre un fenómeno de desplazamiento de los materiales tejidos en forma de pétalo conforme ocurre una solución de continuidad o ruptura. Ambos modelos son propuestas aplicadas para tejido blando biológico; sin embargo, estos efectos son descartados para el modelo propuesto.

Si bien existen otros modelos propuestos para el estudio de la balística terminal, como lo son el modelo de fractura por fragilidad, fractura radial y fragmentación, estos no son considerados para efectos de este trabajo, pues se basan en explicaciones de fenómenos que aparecen cuando el proyectil entra en contacto con tejido biológico duro

2.4.2 MODELO DE DESPLAZAMIENTO (FALLA DÚCTIL)

Este modelo se apega a la teoría de Martel [29], la cual afirma que el volumen desplazado del tejido será proporcional a la energía utilizada (EV). Esta teoría es demostrable a través del uso de objetivos que estén hechos de materiales capaces de presentar deformación plástica o irreversible, como lo son la plastilina o algunos metales como el cobre. Como se muestra en la figura 30. En todo caso, para los objetivos de esta tesis, el modelo de formación de agujero dúctil es el más apropiado.

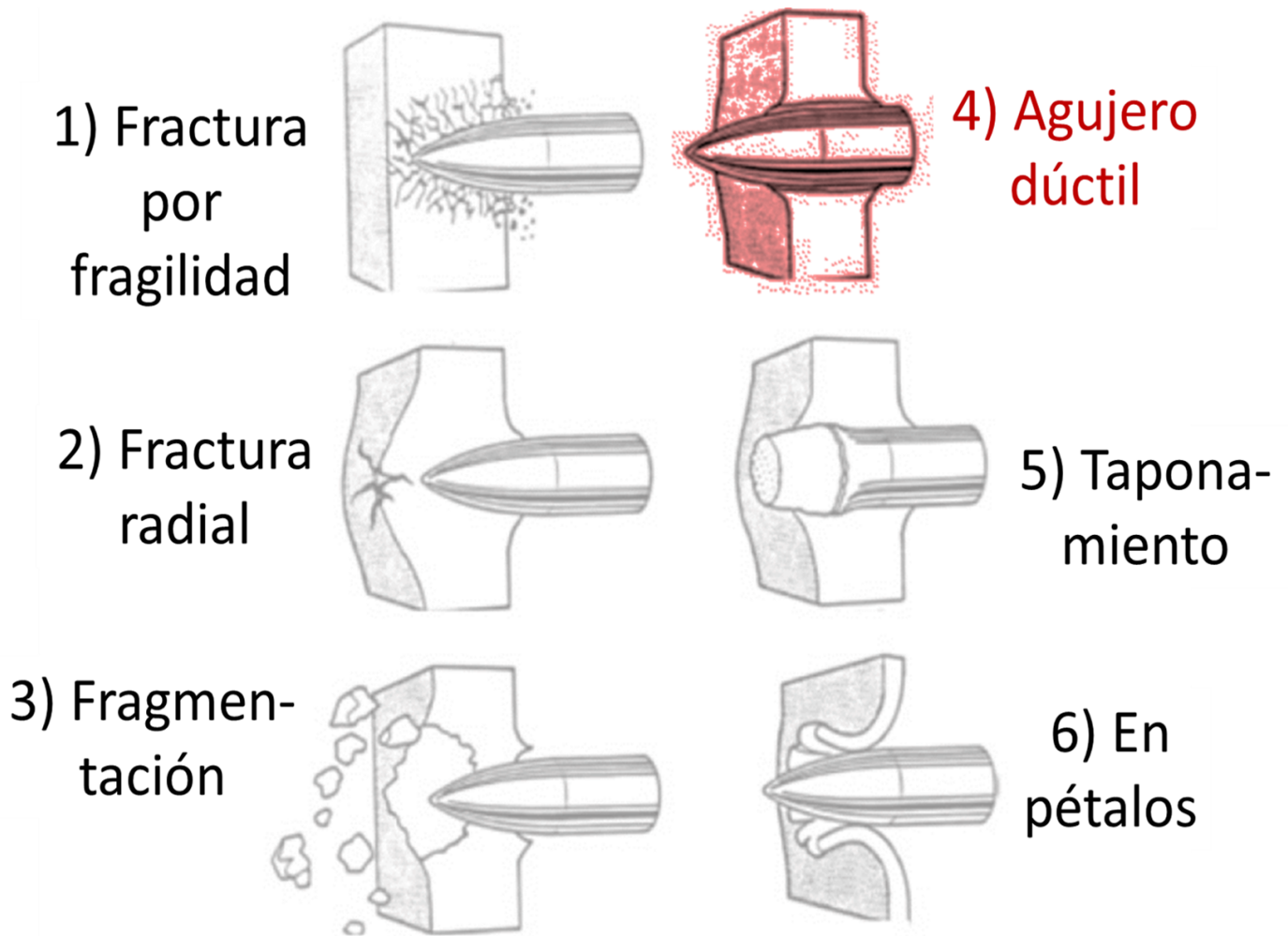


Figura 30. Esquema de modelos de penetración impactados por el mismo tipo de bala. Los tres primeros corresponden a materiales rígidos (como el hueso), mientras que los tres últimos, a materiales deformables (como los tejidos blandos). Modelo de agujero dúctil representa un material plástico [29]

2.4.3 MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE UNA BALA PENETRANDO TEJIDO BLANDO

Inspirado en el desarrollo de ecuaciones aerodinámicas de “Velocidad frente a altura para lanzamiento vertical con arrastre cuadrático” [34] es que se desarrolla y presenta el modelo clave de la tesis. Este modelo presume que un objeto experimenta una fuerza de resistencia proporcional al cuadrado de su velocidad. Si el objeto es lanzado a una velocidad v_0 , entonces tanto la fuerza de gravedad, como la fuerza de fricción, actuarán en dirección descendente mientras se encuentre viajando hacia la dirección contraria. Esta dirección ascendente es tomada en cuenta como positiva, por lo que la velocidad en función de la altura máxima que alcanzará el objeto, será el objeto de cálculo, considerándola como nuestra distancia máxima de penetración.

La penetración de un proyectil dentro de un sólido la abstraemos a una masa puntual y reducimos la cantidad de variables. De modo que sólo conservamos dos fuerzas resistivas que desaceleran el bólido: una fuerza mT , por unidad de masa m , que admite el proyectil en una cinética cuasi-estática en el material; y otra fuerza tipo Rayleigh por unidad de masa proporcional al cuadrado de la velocidad v^2 que se basa en una fuerza de arrastre producida por efectos de viscosidad de un objeto moviéndose dentro del medio. Se ha considerado un intervalo de 10 metros en el que se puede afirmar que la aceleración debida a T es mucho mayor que la aceleración gravitacional g . De modo que los efectos de g son omitidos.

La ecuación que describe el movimiento del proyectil entre los tejidos es:

$$\frac{dv}{dt} = T - kv^2 = T \left(1 + \frac{v^2}{v_T^2} \right), \quad (1)$$

Donde v_T es un parámetro, que llamamos de forma laxa “velocidad terminal”; entonces siguiendo la definición de velocidad terminal:

$$v_T = \sqrt{\frac{T}{k}}. \quad (2)$$

En v se contienen las velocidades de diferentes movimientos, como lo son la velocidad angular (ω), velocidad rotacional (v) y velocidad circunferencial (v), pero la velocidad lineal de la bala presentará un valor mucho mayor que del resto. Por ejemplo, la velocidad de rotación de una bala Luger 9 mm es de 40 m/s (ver tabla 5), lo que representa un 16% de la velocidad total si consideramos que la velocidad lineal es de 250 ms/s; y será del 10% para 400 m/s (ver tabla 6). Entonces, la ecuación de movimiento (1) debe ser transformada para que sea independiente del tiempo por medio de la expresión [33]:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dr} \quad (3)$$

Reescribiendo la ecuación (1) de movimiento como:

$$\frac{dv^2}{dr} = -2T \left(1 + \frac{v^2}{v_T^2} \right). \quad (4)$$

Para agilizar el álgebra, sustituimos los valores que contiene el paréntesis con una variable auxiliar que es u , la cual solo sirve para facilitar el desarrollo teórico, y al final del desarrollo se retira la variable u al regresar con las otras variables originales:

$$u = 1 + \frac{v^2}{v_T^2}. \quad (5)$$

La ecuación de movimiento adquiere ahora la forma:

$$\frac{du}{dr} = \frac{1}{v_T^2} \frac{dv^2}{dr} = \frac{-2T}{v_T^2} u. \quad (6)$$

Reordenando términos, obtenemos:

$$\frac{du}{u} = \frac{-2T}{v_T^2} dr \quad (7)$$

Esta ecuación diferencial puede integrarse para obtener [35]:

$$\ln \left(\frac{u}{u_0} \right) = \frac{-2T}{v_T^2} r \quad (8)$$

Sustituyendo u para recuperar las variables originales de interés y acomodando términos, podemos escribir:

$$\ln \left(\frac{v_T^2 + v^2}{v_T^2 + v_0^2} \right) = \frac{-2T}{v_T^2} r \quad (9)$$

Obtenemos la expresión general al despejar r :

$$r = \frac{v_T^2}{2T} \ln \left(\frac{v_T^2 + v_0^2}{v_T^2 + v^2} \right) \quad (10)$$

Cuando $v = 0$ el proyectil alcanza el reposo; por tanto, la penetración es máxima:

$$\boxed{r_{max} = \frac{v_T^2}{2T} \ln \left(1 + \frac{v_0^2}{v_T^2} \right)} \quad (11)$$

La ecuación 11 representa nuestra ecuación principal de trabajo en esta tesis, pues relaciona la máxima distancia de penetración r_{max} en función de la velocidad de impacto v_0 . El resto de símbolos son constantes. De acuerdo con la literatura, k es un coeficiente en función del coeficiente de penetración C , la densidad del material ρ_m , la densidad de la bala ρ_b , su longitud L . C . [36].

De acuerdo con la literatura, k es un coeficiente en función del coeficiente de penetración C , la densidad del material ρ_m , la densidad de la bala ρ_b , su longitud L . C . [36].

$$k = \frac{C\rho_m}{2\rho_b L} \quad (12)$$

Por otro lado, T es un coeficiente es función de ρ_b , L , y la máxima presión P_{max} en la colisión entre el medio y el proyectil.

$$T = \frac{P_{max}}{\rho_b L} \quad (13)$$

De modo que es proporcional a P_{max} y a ρ_b^{-1} . Sin embargo, para los objetivos de este trabajo mantendremos únicamente a las variables T y v_T como los parámetros experimentales a obtener, sin mayor interpretación. Será en otras investigaciones donde se obtengan el resto de parámetros.

Ahora, para aclarar la influencia de los parámetros T y v_T se elaboraron las gráficas trazadas en la figura 31, mismas que muestran la distancia de penetración máxima en función de la velocidad inicial de los proyectiles. La curva central representa los valores iniciales para T y v_T ; el aumento de T ocasiona una disminución en la penetración. Por su parte el aumento de v_T produce un incremento en la penetración, lo que resulta congruente respecto a sus relaciones matemáticas, que son inversamente proporcionales. Entonces, para una velocidad de impacto, por ejemplo, de 250 m/s el proyectil alcanza una distancia de 0.4 m con las peores condiciones de los parámetros (*i.e.* T alto y v_T bajo). Pero en las mejores condiciones (*i.e.* T bajo y v_T alto) la distancia puede superar 1.2 m.

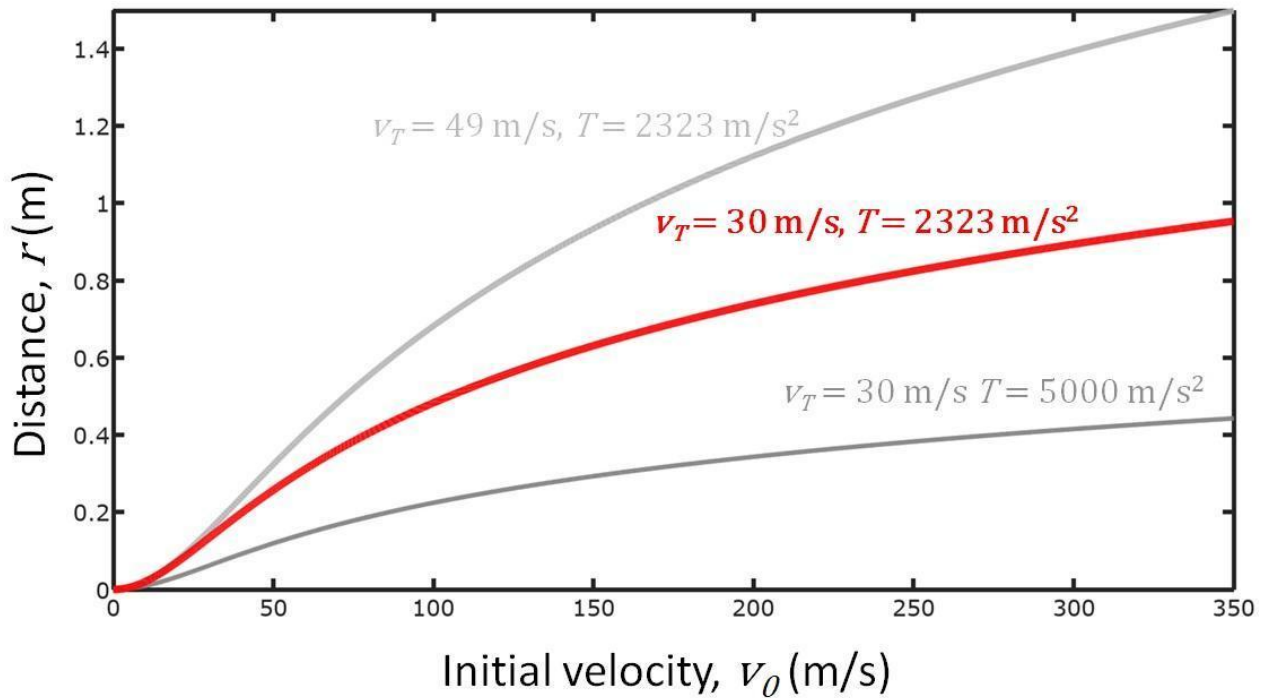


Figura 31. Distancia de penetración en función de la velocidad inicial de los proyectiles. La curva central de color rojo representa los valores iniciales para T y v_T ; el aumento de T ocasiona una disminución en la penetración y aumento de v_T , produce un aumento en la penetración.

Finalmente, si comparamos diferentes medios, podemos suponer que T es independiente de la densidad del material (como sugiere la ecuación 14), pero v_T es inversamente dependiente de la raíz cuadrada de la densidad (como indica la combinación de la ecuación 2 y 15). De modo que si dividimos v_T de dos medios diferentes obtendremos la relación:

$$\frac{v_{T1}}{v_{T2}} = \sqrt{\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}} \quad (14)$$

Despejando v_{T1} tenemos la ecuación de transformación para diferentes medios:

$$v_{T1} = \sqrt{\frac{\rho_{m2}}{\rho_{m1}}} v_{T2} \quad (15)$$

Así, con la ecuación 11 y 15 contamos con las herramientas teóricas para el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se mostraron argumentos sobre la conveniencia de establecer la velocidad de penetración en la piel alrededor de 60 m/s. Observamos que la literatura reporta que la velocidad de las balas de una pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, no superan los 600 m/s. por lo que se esperaría una ausencia de deformaciones en los proyectiles recuperados entre los tejidos blandos o el gel balístico, como sucedió en el caso motivador de este trabajo. Además, los reportes muestran la conveniencia costo-efectiva y ética del uso de gel balístico.

Conceptualmente, el modelo de taponamiento o falla dúctil es el que mejor se apega a las condiciones de los tejidos blandos de nuestro caso. Finalmente, presentamos una función analítica (ecuación 11) que relaciona la distancia máxima de penetración con la velocidad de impacto. El modelo considera una masa puntual, donde sólo es relevante la velocidad lineal del bólido que es afectado por dos fuerzas de frenado: una constante y otra dependiente al cuadrado de la velocidad. Adicionalmente, con el fin de extrapolar los resultados experimentales, la ecuación 15 nos permite considerar los casos cuando el material cuenta con una densidad diferente a los geles balísticos utilizados. Con todos estos elementos podemos exponer en el siguiente capítulo los materiales e instrumentos utilizados en las pruebas empíricas.

CAPÍTULO 3.

MATERIALES, INSTRUMENTOS Y PROCEDIMIENTO

En este capítulo se detallan los instrumentos, materiales e instalaciones que se utilizaron para el desarrollo de las pruebas balísticas. Se enfatiza el proceso para elaborar geles balísticos, las condiciones para efectuar los disparos y la calibración adecuada para adquirir los videos a analizar. Así, también se explica el software utilizado y las operaciones para estudiar las imágenes obtenidas.

3.1 CÁMARA ULTRA RÁPIDA

Para esta tesis se utilizó la cámara de alta velocidad Chronos 1.4. Este dispositivo es capaz de registrar imágenes de video con una velocidad máxima de 1.4 gigapíxeles por segundo. Además, graba videos de 1280 x 1024 a 1057 cuadros por segundo (fps) y puede grabar hasta 38,500 fps al disminuir la resolución del video [23]. Algunas de las características principales de este dispositivo son:

- 1.- Cuenta con un sensor (a color) de imagen que varía su resolución dependiendo de la cantidad de megapíxeles que capte.
- 2.- Alta sensibilidad de ISO que permite obtener una iluminación adecuada.
- 3.- Cuenta con diversos modos de grabación dependiendo de las imágenes que deseen captarse, entre ellos, el modo de grabación "*Run-n-Gun*" que permite registrar ráfagas de video que se guardarán automáticamente en la tarjeta y el modo de grabación continua, que graba video de velocidad normal (60 fps) mientras graba simultáneamente ráfagas de video de alta velocidad.

Para efectos de esta tesis, se utilizó una memoria SD de 16 GB y la velocidad a la que se calibró el equipo fue de 4,434.59 fps para las pruebas preliminares y 17,391 fps para las pruebas experimentales. Se determinó que estas velocidades eran las que mejor se adaptaban a las necesidades de la imagen que se requería, tomando en cuenta las condiciones del medio, procurando guardar los estándares de calidad e iluminación adecuados. Ver tabla 8.

Tabla 8. Registro preestablecido vs. Duración de registro. [23]

Resoluciones y Cuadros Por Segundo (FPS)				
Resolución	Max FPS	Tiempo de grabación en		
		(seg) (8 GB)	(seg) (16 GB)	(seg) (32 GB)
1,280 x 1024	1,057	4.13	8.26	16-52
1,280 x 720	1,502	4.13	8.27	16.54
1,280 x 512	2,111	4.14	8.27	16.54
1,280 x 360	2,999	4.14	8.28	16.56
1,280 x 240	4,489	4.15	8.30	16.60
1,280 x 120	8,923	4.17	8.35	16.62
1,280 x 96	11,119	4.19	8.38	16.76
1,024 x 768	1,771	4.11	8.22	16.44
1,024 x 576	2,359	4.11	8.23	16.46
800 x 600	2,873	4.15	8.30	16.60
800 x 480	3,587	4.15	8.31	16.62
640 x 480	4,436	4.20	8.40	16.80
640 x 360	5,903	4.21	8.42	16.84
640 x 240	8,816	4.23	8.45	16.90
640 x 120	17,424	4.28	8.56	17.12
640 x 96	21,649	4.30	8.61	17.22
336 x 252	15,200	4.43	8.87	17.74
336 x 190	20,020	4.47	8.94	17.88
336 x 120	31,192	4.53	9.07	18.14
336 x 96	38,565	4.60	9.20	18.40

3.2 GELES BALÍSTICOS

Para la elaboración de los geles balísticos se realizaron las siguientes acciones:

- 1.- Se colocó un volumen de 4 litros de agua natural potable en una olla metálica.
- 2.- Se elevó la temperatura del agua con ayuda de una estufa de gas a 45°C. La temperatura del líquido fluctuó entre los 42 y 47 centígrados durante la preparación de los geles y fue monitoreada cada 5 minutos con un termómetro de mercurio.
- 3.- Una vez que se obtuvo la temperatura deseada, se agregaron 400 g de grenetina natural de la marca “Pilsac” 300° Bloom. Esta cantidad se determinó debido a que, para obtener la densidad deseada, se requería una concentración aproximada del 10% de masa. Es importante mencionar que esta adición se realizó de manera gradual para evitar la formación de grumos.
- 4.- Después de diluir la grenetina, se dejó enfriar a temperatura ambiente. Durante esta etapa, se formó una “nata” y algunos grumos en la superficie del líquido, mismos que fueron removidos con un cucharón plástico.
- 5.- Con ayuda de una almohadilla de algodón, se untó una ligera capa de aceite comestible puro de coco de la marca “San Lucas” en todas las caras del contenedor de plástico con el objetivo de evitar la adhesión del gel al momento en el que fuese manipulado o extraído del recipiente.
- 6.- Se vertió el líquido en el molde correspondiente (recipiente plástico de 31.5 x 11.5 x 11 cm³ de alto) y se dejó reposar a temperatura ambiente hasta la solidificación del gel.

El procedimiento antes mencionado se repitió para elaborar los geles utilizados con el arma de fuego, únicamente modificando las proporciones de volumen (9 litros) y de grenetina (900 g de grenetina). El líquido fue vertido en las canaletas de acrílico descritas en el punto 3.2.1.

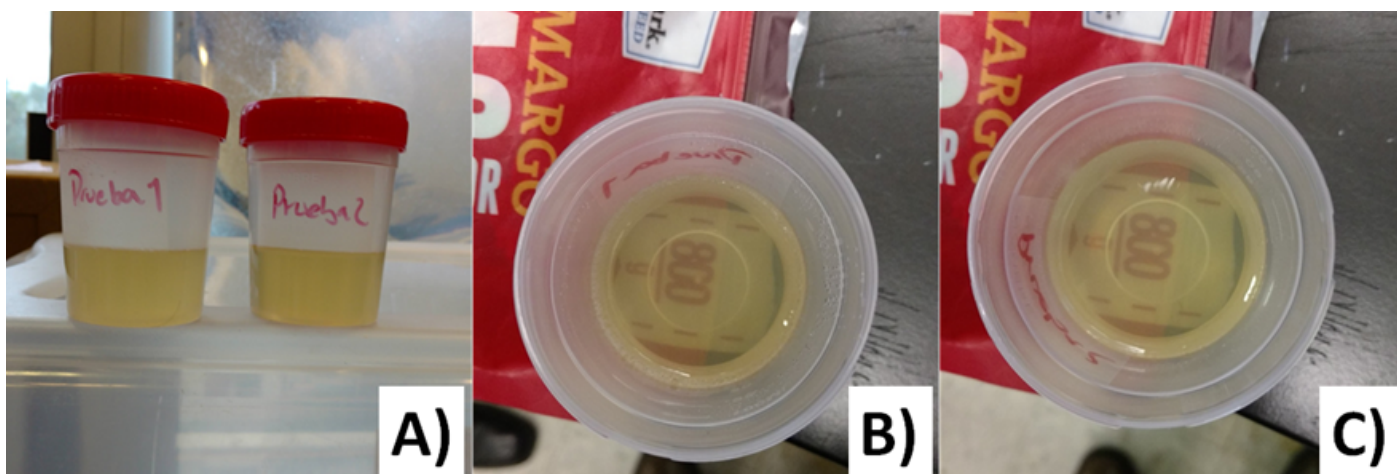


Figura 32. Fotografías de los geles compuestos en una proporción de 10%. En **A)** se muestran las dos muestras preparadas en **B)** y **C)** la inspección respectiva de la transparencia de cada gel.

El gel muestra un color amarillento y una densidad de 1005 kg/m^3 . Para obtener el valor de la densidad, fue necesario obtener la masa del bloque de gelatina con ayuda de una báscula de cocina, mismo que fue de 4.022 kg y posteriormente, se aplicó la fórmula de densidad que expresa la relación que se presenta entre la masa y el volumen de una sustancia: $\rho = m/v$; sustituyendo: $\rho = 4.022\text{kg}/4\text{L} = 1005 \text{ kg/m}^3$. Se determinó que este valor era adecuado toda vez que se encontraba dentro del intervalo de densidades mínimas de tejidos blandos, ver tabla 7. El material es estable por más de dos meses en refrigeración. La figura 32 muestra una prueba preliminar para elaborar el gel.

3.2.1 CANALETA DE ACRÍLICO

Debido al gran volumen del gel preparado, para el desarrollo de las pruebas experimentales, resultaba complicada su conservación, manipulación y transporte hacia el polígono de tiro donde se realizarían las pruebas, por lo que se acordó que dos canaletas de acrílico funcionarían como soportes del gel, pero sobretodo, permitirían observar los cambios sufridos en el interior de la estructura derivado del paso del proyectil. Se decidió utilizar este material por su alta transparencia, resistencia y ligereza. Se utilizó acrílico transparente con dimensiones de $100 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ (capacidad de 10 litros) y un grosor de 9 mm . La figura 33 muestra el diagrama de construcción de las canaletas. Por su parte, la figura 34 presenta las canaletas con el gel.

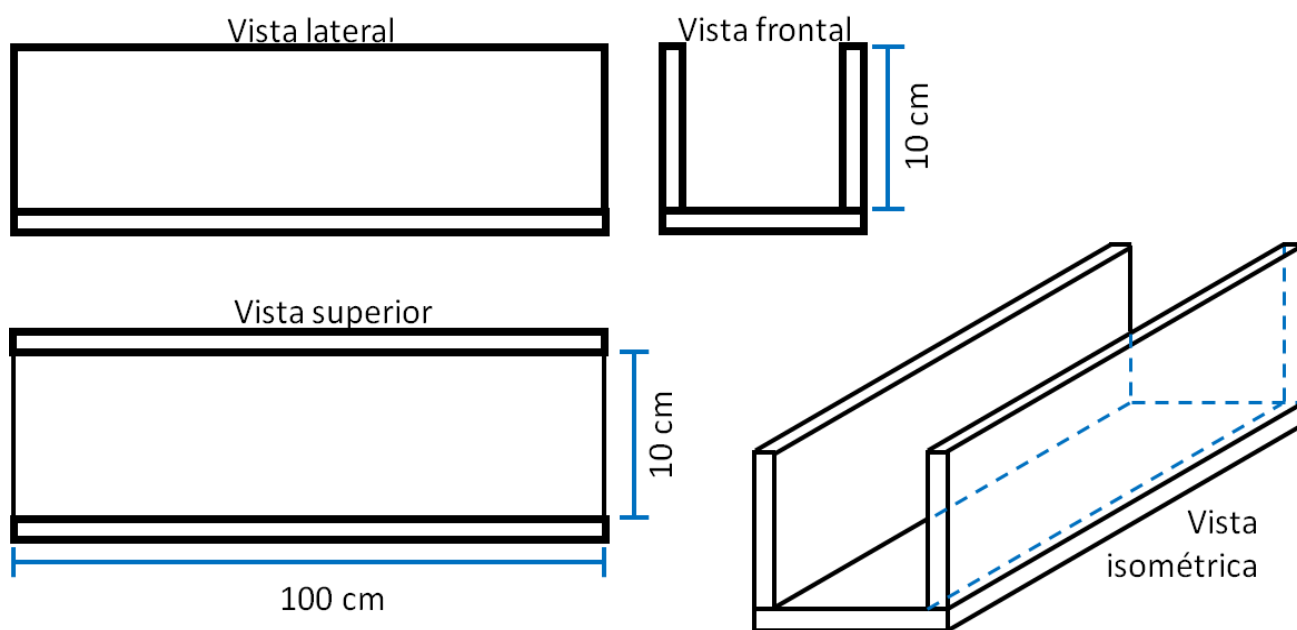


Figura 33. Dibujo técnico de la canaleta de acrílico utilizada para contener el gel balístico. Se muestra una vista lateral, superior, frontal e isométrica con las dimensiones correspondientes.



Figura 34. Fotografía de los geles balísticos dentro de la canaleta de acrílico en el stand de tiro. A un costado se observa el arma Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm empleada.

3.3 ARMA DE FUEGO Y PROYECTIL

Para el desarrollo de las pruebas balísticas, se buscó reconstruir en la medida de lo posible el caso de interés, por lo que el material balístico utilizado, fue el siguiente:

Arma de fuego

De acuerdo a la clasificación presentada en el punto 1.1.2, el objeto de estudio de esta tesis, es un arma Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, de las siguientes características [13]:

- Manejo: Portátil
- Longitud: Corta
- Funcionamiento: Semiautomática
- Apoyo: De puño
- Forma de carga: Retrocarga
- Interior del cañón: Poligonal

Proyectil

El calibre requerido para el arma antes mencionada, es de 9 mm, por lo que los cartuchos utilizados fueron 9 x 19 Parabellum:

- Marca: Toledo
- Calibre: 9 mm
- Longitud de la vaina: 19 mm
- Tipo de vaina: Percusión central
- Modelo: Encamisada o FMJt
- Peso: 125 Grain

Las figuras 35 y 36 muestran la munición utilizada en la prueba con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm.



Figura 35. Fotografía de uno de los cartuchos 9 mm que fue disparado por el arma de fuego en las pruebas experimentales.



Figura 36. Cartuchos calibre 9 mm Parabellum utilizados en las pruebas balísticas desarrolladas en el polígono de tiro con los geles.

3.4 PRUEBAS PRELIMINARES

Antes de realizar la prueba experimental con el modelo de gel balístico y el arma de fuego, se desarrollaron pruebas preliminares con los objetivos de lograr una familiarización con las funciones de la cámara fotográfica. y de observar el comportamiento de materiales y objetos que presentan movimientos y trayectorias a altas velocidades que no fueran observables a simple vista, pero no a una velocidad tan alta como la de un proyectil disparado por un arma de fuego.

3.4.1 EXPERIMENTO PRELIMINAR DE CONTENEDORES DE PLÁSTICO CON AGUA Y RIFLE DE AIRE

Esta prueba fue desarrollada en un espacio abierto con iluminación de luz natural. A continuación se enlista el material utilizado:

- Rifle de aire comprimido, cal 4.5 mm, modelo 2.0; longitud de cañón de 35 cm, ver figura 37.
- Base de madera de 60 cm de largo x 50 cm de alto para sostener el rifle de aire.
- Balines o pellets *pro match competition*, marca GAMO, fabricados en España, para armas calibre 4.5 mm, de 0.49 gramos, ver figura 38.
- Contenedor de plástico translúcido de forma rectangular, con capacidad de 4.2 litros.
- Agua del grifo.
- Equipo fotográfico *Chronos 1.4 High Speed Camera*, calibrado a 4434.59 fps
- Trípode metálico.
- Flexómetro.

El primer paso fue llenar el contenedor de plástico con agua del grifo hasta alcanzar su máxima capacidad y se colocó sobre una superficie plana de concreto de 50 cm de altura. A continuación, se colocó el rifle de aire a un costado del contenedor, de modo que la boca del arma se situó a la altura del centro de una de las caras laterales del recipiente, con una distancia de 10 cm respecto al recipiente de plástico. Después de colocar el rifle de aire en esta posición, se cargó con los perdigones metálicos mediante el proceso de vascular (*i.e.* desdoblamiento el arma). Es importante mencionar que este rifle no es considerado un arma de fuego al carecer en su funcionamiento de un proyectil con pólvora y, por lo tanto, el fenómeno de deflagración está ausente en su interior para la expulsión del proyectil. Estas armas funcionan con aire, mismo que es obtenido de la atmósfera y es el responsable de impulsar el pellet a través del cañón.



Figura 37. Fotografía del rifle de aire, calibre 4.5 mm, modelo 2.0 sobre base de madera.



Figura 38. Fotografías de balines o pellets *pro match competition*, marca GAMO, fabricados en España, para armas calibre 4.5 mm, de 0.49 gramos utilizados en la prueba preliminar con el rifle de aire. En el lado derecho la caja cerrada; en el costado izquierdo, la caja abierta con los balines.

A continuación, el equipo fotográfico fue calibrado hasta que se observó por la pantalla del dispositivo una imagen centrada, clara, nítida (4434.59 fps). Se procedió a realizar el disparo al recipiente y se obtuvo un video de alta velocidad del trayecto y trayectoria del perdigón en el que se observaba el fenómeno de penetración.

Para continuar adquiriendo experiencia con el equipo fotográfico, se realizaron algunas pruebas rápidas con globos de látex, mismas que no consistían en realizar un disparo, sino en reventar un globo de forma manual con ayuda de un objeto punzante, que en este caso fue la punta de un lápiz. Se procedió a inflar un par de globos aproximadamente a la mitad de su capacidad y se apoyaron en una superficie plana. A continuación, se colocó el equipo fotográfico a una distancia de 10 metros y se calibró en las mismas condiciones que en la prueba preliminar anterior.

3.4.2 EXPERIMENTO PRELIMINAR CON GELES Y RIFLE DE AIRE

Al igual que en el punto 3.4.1 se realizaron pruebas preliminares con el rifle de aire, pero esta vez utilizando el gel balístico. La finalidad de estas pruebas era observar el comportamiento y las deformaciones que sufre el material al ser penetrado por un proyectil proveniente de un rifle de aire. Para el desarrollo de la experimentación, se utilizó el siguiente material:

- El rifle de aire comprimido en su montura de madera, con los mencionados balines calibre 4.5 mm.
- Mesa de plástico de 80 cm de altura.
- Gel balístico previamente fabricado.
- Equipo fotográfico *Chronos 1.4 High Speed Camera*, calibrado a 4434.59 fps.
- Trípode.
- Flexómetro.

Las condiciones fueron similares a las pruebas realizadas con los contenedores de plástico y agua del grifo: se colocó el gel sobre la mesa de plástico y el rifle de aire apuntando al centro de una de sus caras laterales. A 10 m de distancia, se colocó el trípode con el equipo fotográfico; la diferencia en relación al experimento anterior, fue que en esta ocasión, la cámara fotográfica no fue activada directamente desde el equipo, sino que se utilizó un cable BNC para evitar que el video presentara vibraciones como resultado de oprimir el disparador. Los conectores BNC tienen la función de facilitar la conexión de cables coaxiales a diversos equipos audiovisuales únicamente insertándose en la toma del dispositivo y girando el anillo, haciendo que la conexión sea fuerte y durable [37]. Una vez que se colocaron todos los elementos necesarios para la prueba, se realizaron dos disparos hacia el interior del gel desde cada una de las caras laterales. Los videos obtenidos fueron analizados y se explican en el punto 4.1.2.

3.5 EXPERIMENTACIÓN CON GELES Y ARMA DE FUEGO

3.5.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS PRUEBAS BALÍSTICAS

El lugar en el que se desarrollaron las pruebas para esta tesis, fue en el *stand* de tiro de la fábrica *Mendoza Shooting Sports S.A.P.I. de C.V.* ubicada en la alcaldía Xochimilco, Ciudad de México. *Mendoza Shooting Sports* es una empresa mexicana especializada en la distribución de productos de campismo y tiro deportivo, motivo por el que periódicamente realizan pruebas de tiro de los productos previo a su comercialización.

Como muestra la figura 39, estas pruebas se realizaron en un lugar cerrado, lo que representó un desafío al momento de operar el equipo fotográfico de alta velocidad, pues la iluminación artificial modifica drásticamente la imagen observada, haciendo que disminuya notablemente su calidad. Esto se debe a que las condiciones de la cámara exigen una gran cantidad de luz, motivo por el que se recomienda utilizar el equipo en espacios abiertos con iluminación natural, o bien utilizar una fuente de luz continua. En nuestro caso usamos una lámpara led Godox SL-100W.



Figura 39. Fotografía del stand de tiro de la fábrica “Mendoza Shooting Sports S.A.P.I. de C.V.”, donde se realizaron las pruebas con las pistolas 9 mm y los geles balísticos.

3.5.2 PREPARACIÓN Y ACONDICIONAMIENTO DEL LUGAR

Al arribar al stand de tiro, se colocó el material en una posición estratégica que previamente se había establecido en un plan de trabajo. Se comenzó posicionando una mesa de plástico de 80 cm de altura en posición horizontal respecto al plano de grabación con la cámara ultra rápida y se situó el primero de los geles balísticos sin removerlo de la canaleta de acrílico sobre dicha mesa, también en una posición horizontal.

Perpendicular al largo de la canaleta y a 10 metros de distancia de la mesa se colocó la cámara fotográfica, sostenida por un trípode metálico. Se trató de nivelar el plano de sustentación para obtener una imagen horizontal de la canaleta para obtener una calidad de imagen adecuada (17,391 fps). Se colocó el conector BNC al dispositivo y nos situamos un par de pasos atrás por cuestiones de seguridad.

Para corregir en la medida de lo posible el factor de la carencia de iluminación descrita previamente en el punto 3.5.1 una lámpara led se colocó aproximadamente a la misma altura de la mesa, pero en la parte posterior de ésta. Se giró ligeramente de modo que el reflejo no siguiera una dirección hacia la cámara que captaría la imagen. Gracias a esta fuente de iluminación, fue posible aumentar considerablemente la cantidad de luz captada por el diafragma y así, obtener mejores condiciones en la calidad de imagen.

Ahora bien, en cuanto al manejo del arma de fuego de esta prueba, solicitamos apoyo de un tirador de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), pues era necesario que los disparos tuvieran ciertas especificaciones en cuanto a factores de distancia y precisión. Para esto, nuestro tirador se posicionó a 90 grados del plano de grabación, en el costado derecho de la mesa con el gel balístico, ver figura 40.



Figura 40. Fotografía de una de las pruebas realizadas en el stand de tiro de “Rifles Mendoza”. El tirador se encuentra a 90 grados respecto al plano de grabación, a una distancia de 10 metros de la cámara. Fotografía por la Dra. Zoraida García Castillo.

La boca del arma se posicionó en el centro de una de las caras laterales del gel (para evitar que se presentaron desviaciones considerables del proyectil o bien, que la trayectoria que siguiera fuera demasiado ascendente o descendente) a una distancia aproximada de 0.5 m. Originalmente, se tenía contemplada una distancia de 1 m entre el arma y el blanco, pero debido a las condiciones del stand de tiro, fue necesario modificar este valor; sin embargo, para efectos de esta tesis, el resultado a esta corta distancia, fue exitoso. El tirador fue el responsable del abastecimiento y carga del arma previo a realizar las pruebas.

Cabe mencionar que, por parte de la fábrica Mendoza, nos proporcionaron el equipo de seguridad adecuado (chaleco antibalas, audífonos para cancelación de ruidos, lentes de seguridad) y todo el tiempo se siguieron las medidas de seguridad y precauciones mencionadas en apartado 1.4.1 de este trabajo.

3.5.3 DESARROLLO DE LA PRUEBA

El tiempo de grabación de las cámaras de alta velocidad debe ser tan breve como sea posible toda vez que la cantidad de cuadros que se captan cada segundo, son demasiados, provocando que una grabación de pocos segundos, resulte en un video que puede durar varios minutos. Por esta razón, fue necesario establecer una coordinación con el tirador de las pruebas; se acordó que se contaría hasta tres y se daría la orden “¡Dispara!”, de modo que, al momento de vociferar el número “dos” se activaría el botón que iniciaría la grabación del equipo, haciendo que el tiempo de grabación fuera de máximo 3 segundos. Una vez que las condiciones del espacio estaban listas y todo el personal presente contaba con el equipo de seguridad necesario, se procedió a realizar los disparos. Al concluir con las detonaciones, enseguida se detuvieron las grabaciones del equipo fotográfico y se guardaron copias de seguridad en dispositivos de almacenamiento (*laptop* de uso personal y memoria USB). Los videos se analizaron mediante el software *Tracker-Physics*, mismo que es explicado en la siguiente sección.

Finalmente, se evaluó la condición final del gel. Se observó desde la parte exterior, midiendo las distancias de penetración y fotografiado desde distintos ángulos los efectos del proyectil. En la primera prueba realizada, fue necesario hacer un par de cortes transversales en el gel con ayuda de un cúter para recuperar el proyectil que permaneció alojado, mismo que fue observado y fijado fotográficamente también.

3.5.4 PROCESO DE VIDEO ANÁLISIS

Tracker-Physics es un programa multiplataforma de análisis de video, que permite construir modelos dinámicos de cuerpos en movimiento. Gracias a esta herramienta gratuita, se puede realizar un seguimiento ya sea manual, o automático, de diversos objetos debido a la variedad de herramientas que facilitan tareas como la medición de ángulos y distancias, así como el graficado y análisis de datos [38].

Se pretendía que el uso de este software nos permitiera realizar el seguimiento del movimiento de una masa puntual, observando cómo se generan las coordenadas correspondientes de la trayectoria seguida.

Procedimiento para el análisis de vídeos en *Tracker-Physics* [39]:

- 1.- Importar el video al programa *Tracker-Physics* y seleccionar el segmento de interés a través del marcaje manual del fotograma inicial marcado como $t=0$ y el fotograma final. Este intervalo puede recibir el valor de 1, 2 o 3, lo que significa que pueden estudiarse cada uno de los fotogramas del intervalo seleccionado o bien, cada 2 o 3, dependiendo de la duración del vídeo. Para el análisis de las pruebas, el intervalo seleccionado fue de 1.
- 2.- Establecer una escala de los objetos observados, colocando una vara de calibración. Este elemento requería abarcar por completo la longitud de una medida que fue la referencia principal, toda vez que se trataba de un distancia real cuyo valor era conocido (en el caso de las armas disparadas dentro de la alberca, la distancia de referencia fue la longitud del arma).
- 3.- Seleccionar un sistema de coordenadas que permite la medición de posiciones y velocidades del móvil de interés. Para todos los casos de proyectil penetrando el agua de la alberca o el gel, el origen del sistema de coordenadas se ubicó en el punto donde el bólide alcanza su velocidad mínima. Este sistema de coordenadas permite relacionar distancias cortas con velocidades pequeñas, y distancias amplias con velocidades grandes. Ubicar el sistema de coordenadas en otro lugar no es útil para este trabajo.
- 4.- Definir una masa puntual, lo que se traduce como una selección manual del seguimiento del proyectil durante su paso a través del medio. Para esto, se colocó el cursor sobre el objeto móvil y cada vez que éste se seleccionaba, se creaba una marca en la interfaz y, automáticamente, se mostraba el fotograma siguiente.
- 5.- En el costado derecho de la interfaz de *Tracker*, se visualiza una ventana en la que aparece un valor numérico y un plano cartesiano en el que se forma una gráfica conforme se registran los puntos de interés.
- 6.- Por definición del programa, la gráfica formada es la coordenada horizontal contra el tiempo x vs t . Por lo que realizamos el cambio de variables a la distancia recorrida contra la velocidad registrada r vs. v .
- 7.- Los datos de distancia y velocidad fueron exportados a Excel para obtener los ajustes de los datos a la curva que describe la ecuación 11.

Tracker realiza el cálculo automático de la velocidad en el punto n (que es parte del conjunto de datos) de la distancia r_n y la velocidad v_n mediante las siguientes fórmulas [39]:

La distancia se obtiene mediante las coordenadas y el teorema de Pitágoras:

$$r_n = \sqrt{x_n^2 + y_n^2}, \quad (16)$$

La velocidad de en el eje-x es la diferencia entre puntos consecutivos divididos entre el doble del lapso entre los puntos:

$$v_{xn} = \frac{x_{n+1} - x_n}{2\Delta t}, \quad (17)$$

De modo similar se obtiene la velocidad en el eje-y:

$$v_{yn} = \frac{y_{n+1} - y_n}{2\Delta t}, \quad (18)$$

Finalmente, para obtener el módulo de la velocidad, se recurre otra vez al teorema de Pitágoras, pues las velocidades de los ejes son las componentes de la velocidad neta:

$$v_n = \sqrt{v_{xn}^2 + v_{yn}^2}, \quad (19)$$

Donde (x, y) son las coordenadas espaciales del b6lido y Δt es tiempo entre cuadros del video. Entonces, el c6lculo de la velocidad en un punto es el resultado del promedio entre dos puntos vecinos inmediatos. As6, la incertidumbre en v es un poco m6s grande que en r al implicar m6s operaciones.

Los datos de r contra v se ajustaron a la ecuaci6n 11 mediante la funci6n:

$$r = A \ln(1 + Bv^2) + C \quad (20)$$

Donde los par6metros A , B y C son valores num6ricos que se calculan mediante la computadora (en la hoja c6lculo) al tratar de obtener el mejor factor de correlaci6n R^2 . Es decir, se busca la combinaci6n de par6metros que permitan obtener un valor de correlaci6n cercano a 1.

RESUMEN DEL CAPÍTULO

En este capítulo se describieron los materiales e instrumentos empleados para el desarrollo tanto de las pruebas preliminares como para la prueba experimental principal de esta investigación. Se detalló el procedimiento de preparación de los geles balísticos que permitió la obtención de un producto satisfactorio y de utilidad para los fines requeridos; se mostró el acondicionamiento de los diversos materiales necesarios para las pruebas balísticas en las instalaciones del stand de tiro, de modo que nuestra seguridad e integridad, se preservaron en todo momento y los resultados de la experimentación fueron adecuados para los análisis correspondientes. Por último, se describió el análisis de datos para la obtención de resultados, mismos que son descritos en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS DE PRUEBAS PRELIMINARES

4.1.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CONTENEDORES CON AGUA Y RIFLE DE AIRE

Como se mencionó en el capítulo anterior, esta prueba fue realizada únicamente como ejercicio de familiarización con el equipo fotográfico. Sin embargo, gracias a ésta, se identificó la necesidad de utilizar un cable BNC, pues la imagen mostraba vibraciones derivadas de la presión ejercida en el botón de activación. Esta prueba fue inspirada en experimentaciones encontradas en el sitio web *YouTube* que no son de mi autoría. En la primera de éstas llamada “Underwater bullets at 27,000 fps” (*Balas bajo el agua a 27,000 cuadros por segundo*)[40] se captó el movimiento de un proyectil disparado por una pistola Ruger 9 mm y posteriormente, el de un proyectil percutido por revólver, ambos sumergidos en el agua de una piscina. De acuerdo con los autores de los videos, se utilizó una cámara Phantom v1610 siendo la velocidad de obturación del equipo para estos vídeos de 27,450 fps.

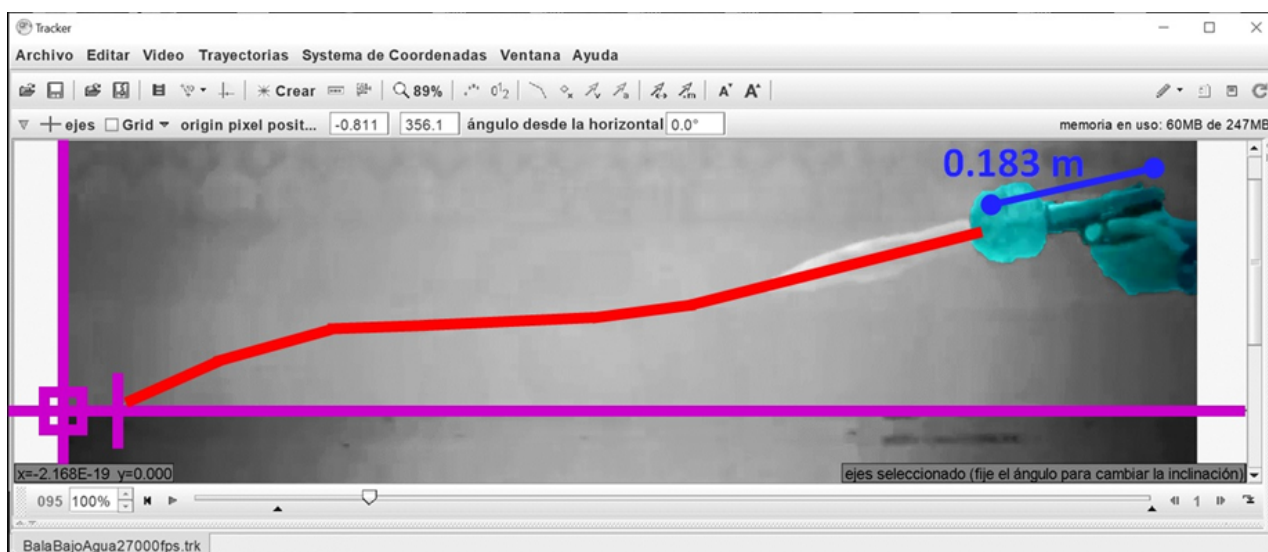


Figura 41. Captura de pantalla colorizada de *Tracker-Physics* resaltando el trayecto marcado en la máquina, la posición del eje coordenado cerca de la finalización del movimiento del proyectil y la colocación de la vara de calibración en el cañón del arma tipo Ruger 9 mm [40]

Derivado de la obtención de múltiples registros de coordenadas en el tiempo, se obtuvo un ajuste de línea (R^2) de 0.9190 para el arma Ruger 9mm con un marcaje de 450 puntos, mientras que para el análisis del disparo proveniente del revólver, se definieron un total de 311 puntos, con un ajuste (R^2) de 0.9215.

El siguiente análisis fue también una referencia para los disparos el arma la Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, siendo ésta mediante otro vídeo descargado de internet, titulado “AK-47 Underwater at 27,450 frames per second (part 2)” [41]. El equipo de vídeo utilizado para tal vídeo fue el mismo de los casos anteriores, pero a diferencia del vídeo anterior, el arma utilizada es un fusil AK-47. Nuevamente, el proyectil siguió una trayectoria descendente en la piscina, alcanzando una distancia entre 5 y 6 ft (± 1.65 m). Los proyectiles de este tipo de armas suelen tener un alcance entre los 300 m (modo automático) y 1000 m (con ajuste de mira) cuando son disparados en el aire, por lo que una densidad de 997 kg/m³ (densidad del agua) modifica significativamente estos valores. En este caso el número de puntos medidos en el Software, fue de 176, logrando un ajuste (R^2) de 0.9555.

4.1.2 RESULTADOS DE PRUEBAS CON GELES Y RIFLE DE AIRE

Como se muestra en las figuras 42 y 43, en los dos tiros realizados los proyectiles realizaron un trayecto similar, alcanzando una distancia de penetración de 17 cm en ambos casos. La dirección del trayecto fue levemente descendente toda vez que la orientación del arma apuntaba con una angulación ligera hacia la parte inferior del bloque de gel. Cabe mencionar que, la existencia de un primer disparo fue invariante del resultado del segundo, toda vez que la cavidad formada no presentó una magnitud suficiente para modificar las condiciones del interior del medio.

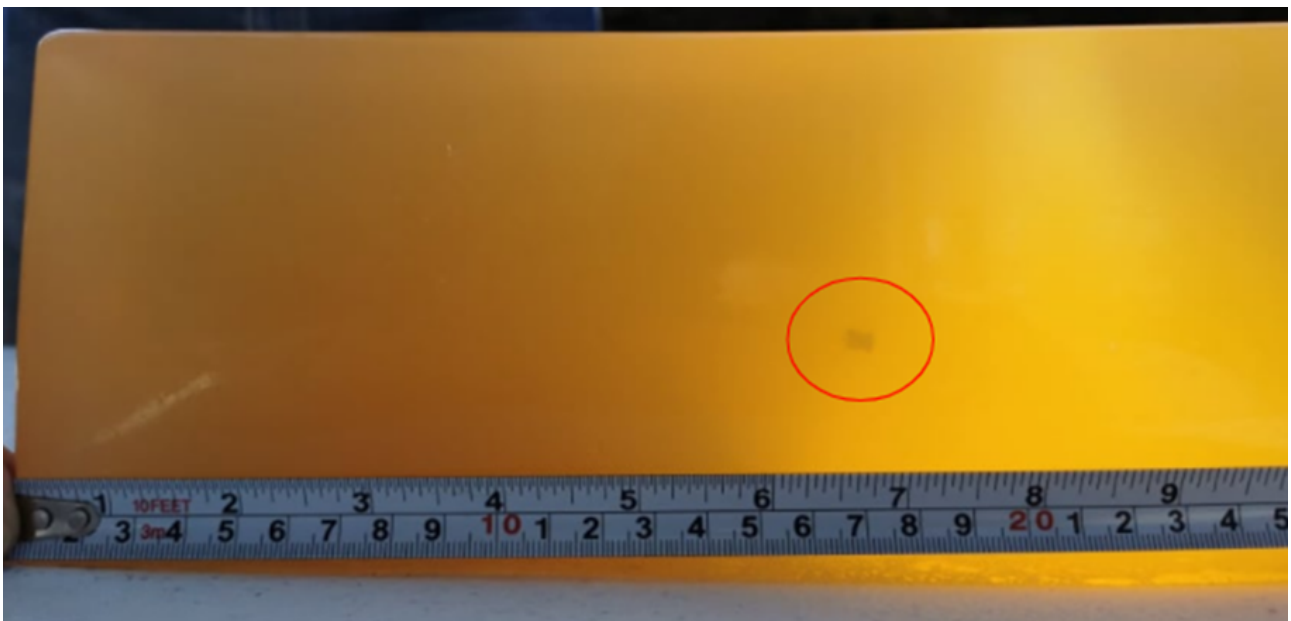


Figura 42. Fotografía del gel balístico con el proyectil del rifle de aire incrustado. La circunferencia roja muestra la posición final del perdigón disparado. Se observa que la distancia de penetración es de 17 cm.



Figura 43. Fotografía del gel balístico, utilizado en ambas pruebas con el rifle de aire. Las circunferencias rojas indican la ubicación de los perdigones incrustados en el gel. En el perdigón del lado izquierdo de la imagen, se observa la clara ausencia de deformaciones.

Concluidas las mediciones y la fijación fotográfica de los geles balísticos, se procedió al análisis en el software *Tracker-Physics*. Tomando en cuenta las condiciones del vídeo obtenido, el segundo disparo resultó de mayor utilidad para efectos de este trabajo, ya que en éste era posible observar con más claridad el paso del proyectil a través del gel.

Como se observa en la tabla 9 los resultados de ambos disparos no presentaron grandes diferencias; la cantidad de puntos creados a través *Tracker-Physics* osciló entre los 67 (primer disparo) y 77 (segundo disparo), con un ajuste de línea de 0.7756 y 0.8595 respectivamente.

Ahora bien, en la figura 44 se observa una captura de pantalla obtenida de la interfaz del Software *Tracker-Physics* que muestra el análisis de vídeo de la segunda prueba con el rifle de aire. En la ventana izquierda de la figura se visualiza la imagen de uno de los fotogramas que forma parte del vídeo; nótese que en el costado izquierdo de la ventana se encuentra la boca del cañón del arma y, a pocos centímetros a su derecha, fue colocado el gel balístico. En el punto de la imagen donde comienza la estructura del gel fue colocada la escala o vara de calibración, mientras que el sistema de coordenadas se posicionó colocando su respectivo origen en el punto donde el proyectil alcanzó su penetración máxima y detuvo su movimiento.

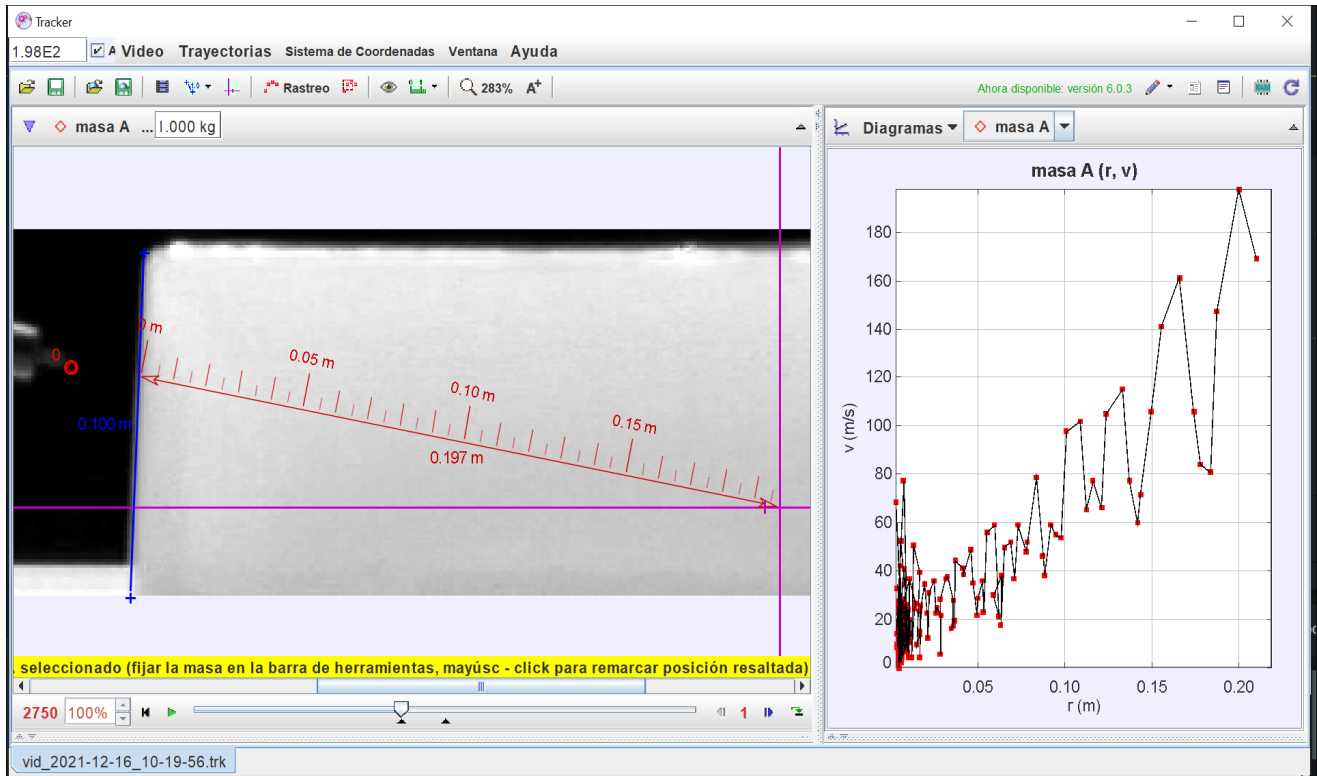


Figura 44. Captura de pantalla del programa *Tracker-Physic* al estudiar el segundo video del rifle de aire disparando al gel. En la ventana izquierda se muestra el cañón del rifle, el gel, el eje coordenado, la vara de calibración, una cinta métrica y el primer punto marcado en el video. La ventana derecha presenta la gráfica velocidad en función de la distancia de los puntos marcados en el video. El video correspondiente de este estudio se encuentra disponible en: <https://youtu.be/63KCfH9Kbkk>

Continuando con el análisis del segundo disparo con el rifle de aire, se midieron 77 puntos para dar seguimiento al movimiento del balín en el interior del gel y 4 puntos más fueron marcados desde la salida del cañón del arma hasta el momento en que impacta el gel, lo que, simultáneamente, llevó a la formación de una gráfica en el plano cartesiano observado en la ventana derecha de la interfaz. Esta medición de puntos muestra en el eje Y la velocidad (v) del diábolo en el aire en función de la distancia recorrida (r) previo al momento de impacto, observada en el eje X. El promedio de la velocidad obtenida, fue de 151 ± 9.6 m/s (*e.i.* error relativo de 6%). El error relativo presenta un rango de incertidumbre en una experimentación, por lo que un valor de 6% muestra que la prueba es confiable al encontrarse muy cerca del valor real de la velocidad del proyectil.

Tabla 9. Valores de los mejores parámetros de ajuste entre el modelo de penetración balística y los datos medidos en los videos.

Tipo de arma	$v_T^2 / 2T$ (m)	v_T^{-2} (s ² /m ²)	r_0 (m)	R ²	# puntos
1) Ruger 9 mm	0.1937	111×10 ⁻⁶	0.01	0.9190	450
2) Revolver	0.6262	121×10 ⁻⁶	-0.07	0.9215	311
3) Fusil AK-47	0.1726	470×10 ⁻⁵	-0.01	0.9555	176
4) Rifle de aire (B)	0.0569	1×10 ⁻³	2.6×10 ⁻³	0.8695	77
5) Rifle de aire (A)	0.0585	0.71×10 ⁻³	14.4×10 ⁻³	0.7756	67
6) Glock®9mm(A)	0.3299	0.3×10 ⁻⁴	0.45	0.7271	23
7) Glock®9mm(B)	0.4062	0.421×10 ⁻⁴	9.6×10 ⁻³	0.9037	59

Es posible observar que los datos medidos muestran dispersión e irregularidades u oscilaciones que muestran “cambios de velocidad” del bolido durante su movimiento. Si bien es cierto que no se presentaron variaciones de densidad a lo largo del medio penetrado, debe recordarse que la marcación de cada una de las masas puntuales del trayecto fue realizada de forma manual a través del Software *Tracker-Physics*, por lo que el error humano en ese tipo de análisis puede ser relevante.

Entre menor sea la cantidad de puntos marcados en el análisis del vídeo, evidentemente, menor será la cantidad de datos con los que se contarán para graficar los resultados, lo que provocará que ante el mínimo cambio de velocidad entre las masas creadas en el software durante el movimiento del proyectil, mayor será la oscilación presentada.

Tabla 10. Cálculo de los parámetros V_T y T para las diferentes armas.

Tipo de arma de fuego	V_T	T
1) Ruger 9 mm	95	23,255
2) Revolver	91	6,599
3) Fusil AK47	15	616
4) Air Rifle (B)	33	8,787
5) Air Rifle (A)	38	12,038
6) Glock®9mm(A)	183	50,520
7) Glock®9mm(B)	154	29,238

4.2. ANÁLISIS DE PRUEBAS CON ARMA DE FUEGO

En la primera prueba balística desarrollada en el stand de tiro se colocó el gel sin remover la canaleta de acrílico que lo contenía. Este factor fue relevante, pues favoreció una liberación de energía que provocó la ruptura de la montura de acrílico.



Figura 45. Fotografía de la primera prueba realizada en el stand de tiro de “Rifles Mendoza”. Se observa el momento en el que el proyectil se encuentra en movimiento durante su trayecto a través del gel, causando una liberación de energía que se manifiesta mediante la pérdida de uniformidad de la canaleta. Fotografía por la Dra. Zoraida García Castillo.

Los explosivos utilizados en este tipo de arma y calibre, suelen ser “instantáneos” y se caracterizan por contar con una alta sensibilidad capaz de modificar el estado sólido de un objeto (pólvora) a gaseoso de manera inmediata. Se observó este fenómeno durante el paso del proyectil a través del gel, pues la canaleta de acrílico presentó una pérdida de uniformidad al romperse en múltiples fragmentos como consecuencia de la cantidad de energía que fue liberada por los costados de la estructura, acompañada de una onda expansiva.

En esta prueba, se presentó un orificio de entrada en el centro de una de las caras laterales del gel y, como se aprecia en la figura 46, la distancia de penetración lograda fue de 92 cm. A esta distancia recorrida, el proyectil detuvo su movimiento, permaneciendo así en el interior del gel, motivo por el que no existe un orificio de salida en la estructura.

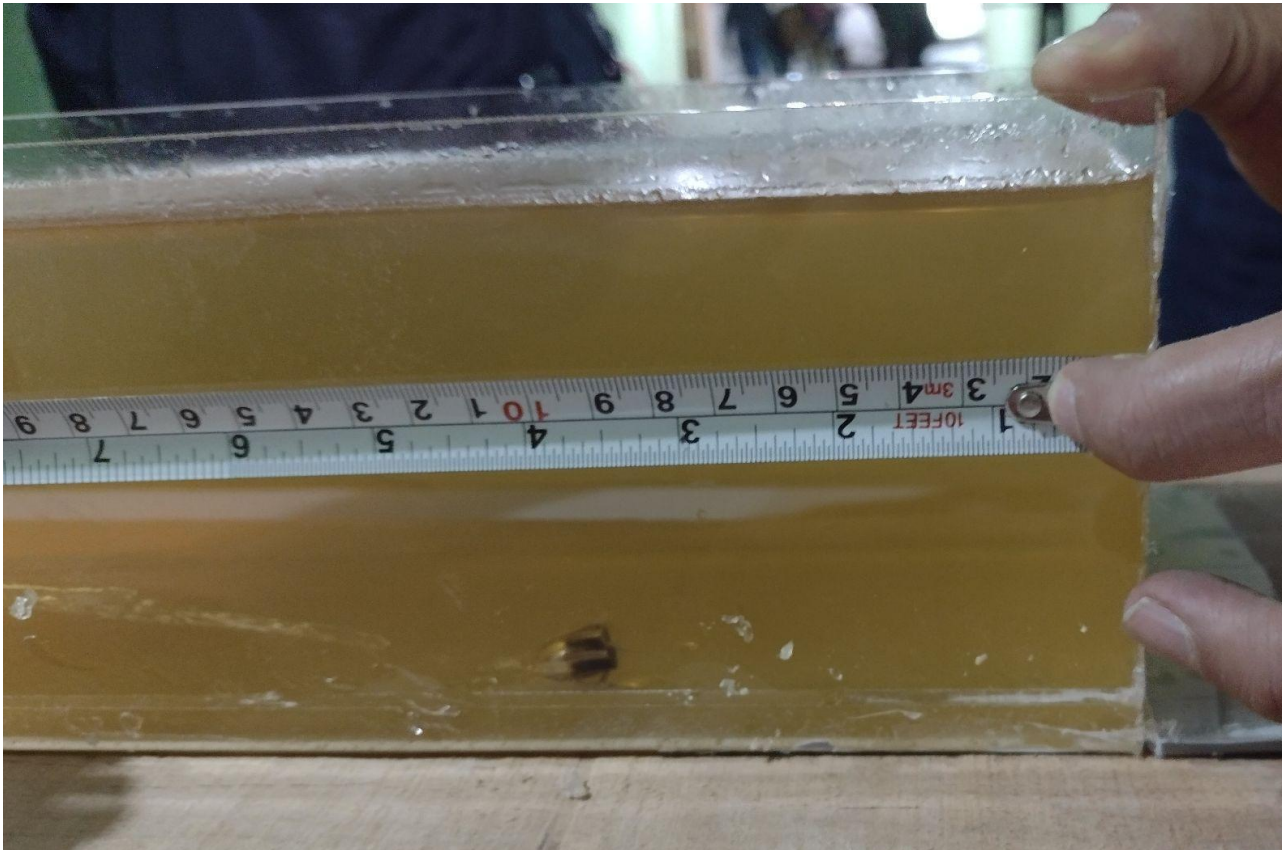


Figura 46. Gel balístico con proyectil 9 mm incrustado, después de realizar el primer tiro con pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm. La distancia de penetración de la bala fue de 92 cm.

Como se ha mencionado en el apartado 3.5.3, fue necesario realizar algunos cortes en el gel posterior a su penetración con el proyectil. El objetivo de realizar estos cortes, era tanto recuperar la bala incrustada, como validar cómo el paso del proyectil deforma el canal de la herida a lo largo de los tejidos conforme se desplaza. En esta experimentación, no se presentaron cambios significativos en el trayecto del proyectil, lo que se debe a que la variación de la energía cinética a lo largo de la cavidad temporal formada, no fue considerable

Al igual que en el apartado 4.1.2, se realizó el análisis del vídeo de este disparo para conocer la velocidad del proyectil durante su trayectoria. La cantidad de puntos medidos, fue únicamente de 23, pues el encuadre de las lentes ópticas fue insuficiente para registrar el trayecto a todo lo largo del gel. Se obtuvieron 7 puntos previos al impacto con el maniquí biológico que permitieron el cálculo del promedio de la velocidad, siendo ésta de 294 ± 12.2 m/s (*e.i.* error relativo de 4%).

Continuando con la experimentación en el stand de tiro, se realizó una segunda prueba en la que, la única variable modificada fue la colocación del gel sin la canaleta de acrílico. A diferencia de la prueba anterior, en este caso la distancia de penetración del proyectil fue mayor (más de un metro). Incluso, la bala atravesó el maniquí generando un orificio de salida en la cara que se encontraba en posición paralela a la cara de entrada de la bala.

En los vídeos obtenidos a través de la cámara ultra rápida se visualiza la formación de ondas de choque al momento en que la punta del proyectil impacta el gel balístico, creando el orificio de entrada. Estas ondas se propagan a través del gel a altas velocidades por lo que son las responsables de la creación de vibraciones a lo largo de la estructura. Conforme avanza el proyectil en el interior del gel, es posible observar un desplazamiento radial de los materiales, creando un espacio hueco que se forma en la parte trasera del proyectil, posterior a su paso. Además, las características de elasticidad y plasticidad que posee el material utilizado, lo hacen un excelente candidato para la observación de dicha extensión radial, seguida de un breve colapso como consecuencia de la transformación de energía cinética del proyectil, a energía elástica del gel.

Ahora bien, derivado del análisis en *Tracker-Physics*, se obtuvieron algunas gráficas representativas mostradas en las siguientes figuras. En la figura 47 se muestra la distancia de penetración del proyectil en función del tiempo, representado como $r(t)$. Los datos que conforman esta gráfica, se obtuvieron del segundo disparo de la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, pues como se mencionó anteriormente, la segunda prueba permite una mejor visualización del desplazamiento del proyectil. Se observa que la dispersión de puntos es pequeña desde el inicio, volviéndose aún menor conforme pasa el tiempo. Esto se debe a que, al igual que en la figura 44, el origen del sistema de coordenadas se colocó en la posición final del proyectil, por lo que conforme el proyectil se acerca al origen (distancia cero), el ajuste de los puntos se vuelve mayor.

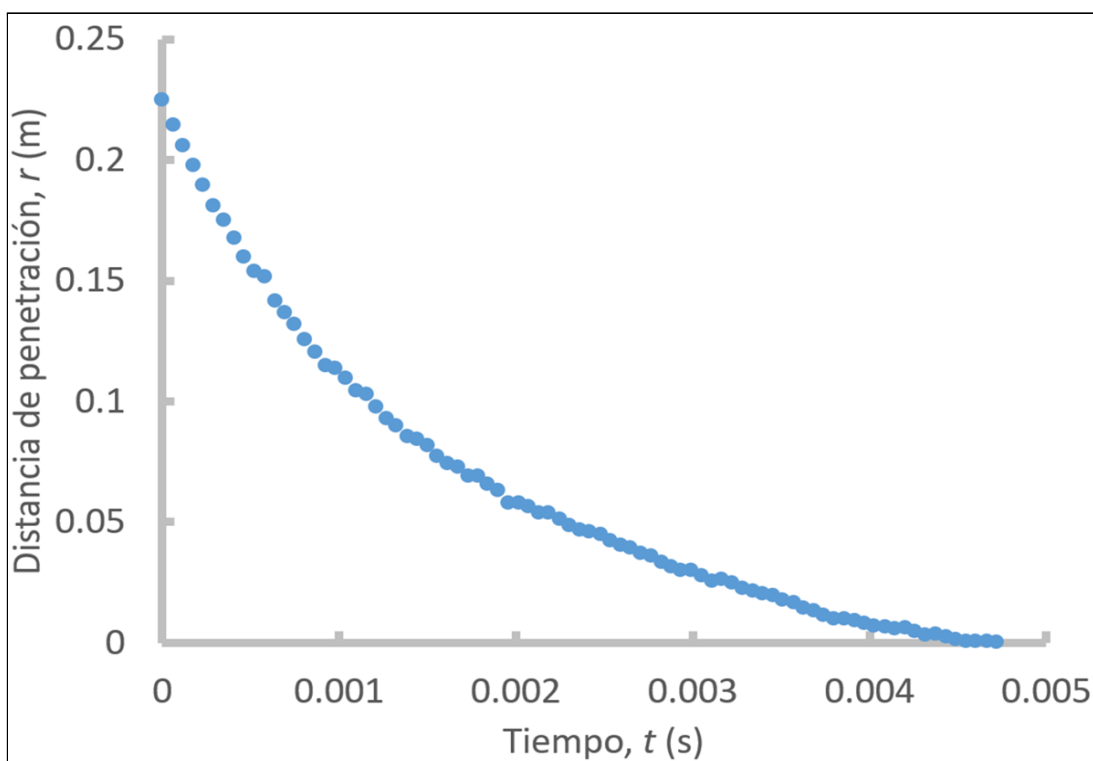


Figura 47 Gráfica de la distancia de penetración en función del tiempo $r(t)$, con datos del segundo disparo de la pistola Glock 9 mm. Note que la dispersión de puntos es pequeña y se vuelve menor conforme se acerca a $v=0$.

Continuando con la figura 48, se presenta un ajuste de curva basado en datos experimentales, en donde la distancia de penetración se encuentra en función del argumento del logaritmo presentado en el modelo teórico.

A diferencia de la figura anterior, estos resultados se basan en los parámetros obtenidos a través de la pistola Ruger 9 mm, mismos que se representan a través de puntos azules. La ecuación mostrada en el eje X, obtenida a través de la suma de 1 y la multiplicación del parámetro v_T^{-1} , fue la que presentaba una menor dispersión y, por lo tanto, un mejor ajuste de curva.

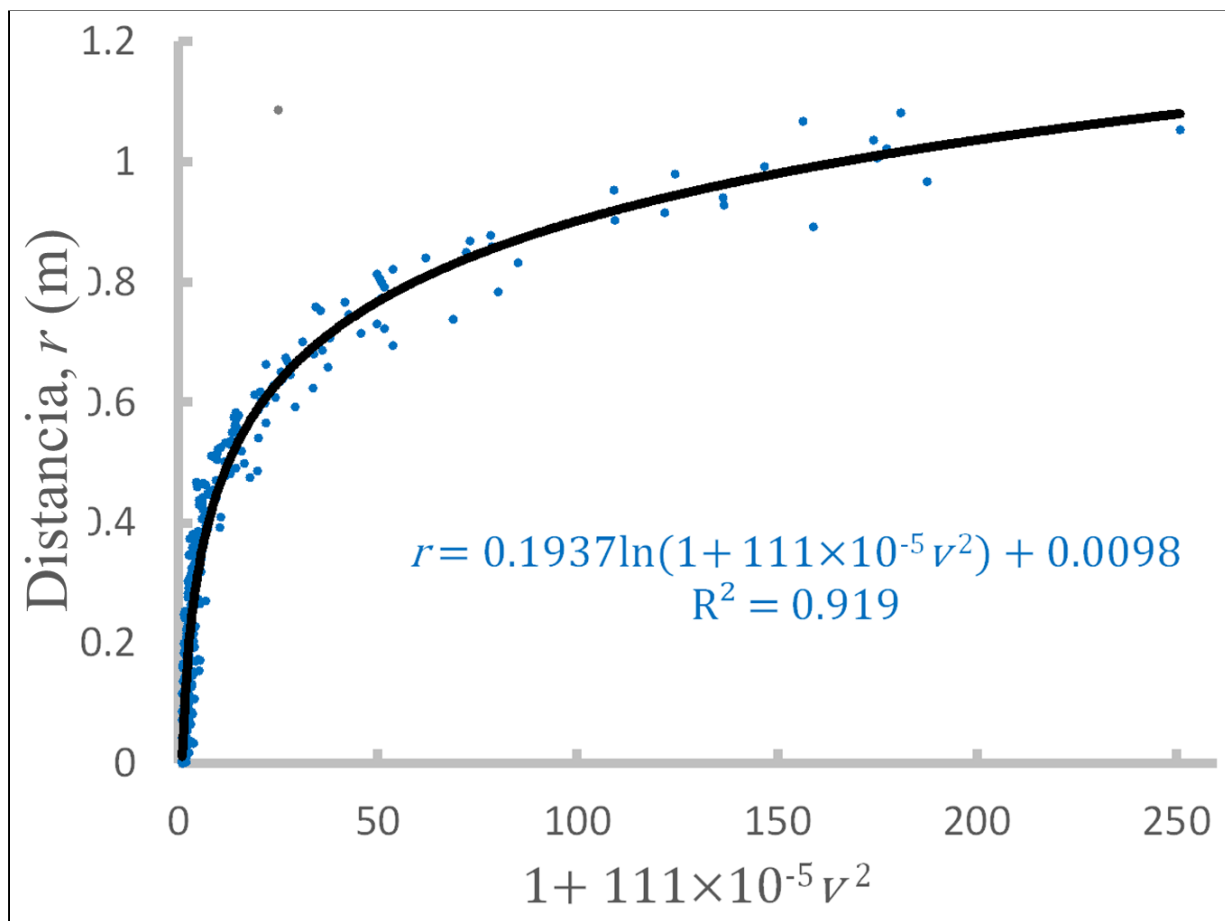


Figura 48. Gráfica de la distancia de penetración en función de la suma de 1 y la multiplicación de un parámetro por la velocidad del proyectil $r(v)$, con datos de la pistola Ruger (puntos azules). Se muestra el ajuste a la función logaritmo (línea continua negra). La ecuación dentro de la imagen es el mejor ajuste a los datos.

La figura 49, nuevamente muestra la distancia de penetración en función de la velocidad del proyectil $r(v)$ basándose en el segundo disparo con el arma Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm. La línea amarilla representa los valores a obtenidos a partir del modelo teórico, mientras que los puntos de color azul, son los datos registrados a través de la colocación de puntos manuales a mediante *Tracker-Physics*, los cuales permitieron el cálculo de la velocidad. Se observa que, a velocidades a partir de los 200 m/s, comienza a presentarse un ajuste considerable en los puntos, mientras que a velocidades por debajo de los 200 m/s, el ajuste es menor, pero no despreciable. Nótese que el coeficiente de correlación tiene un valor 0.0096, lo que significa que los datos se presentan un buen ajuste con el modelo.

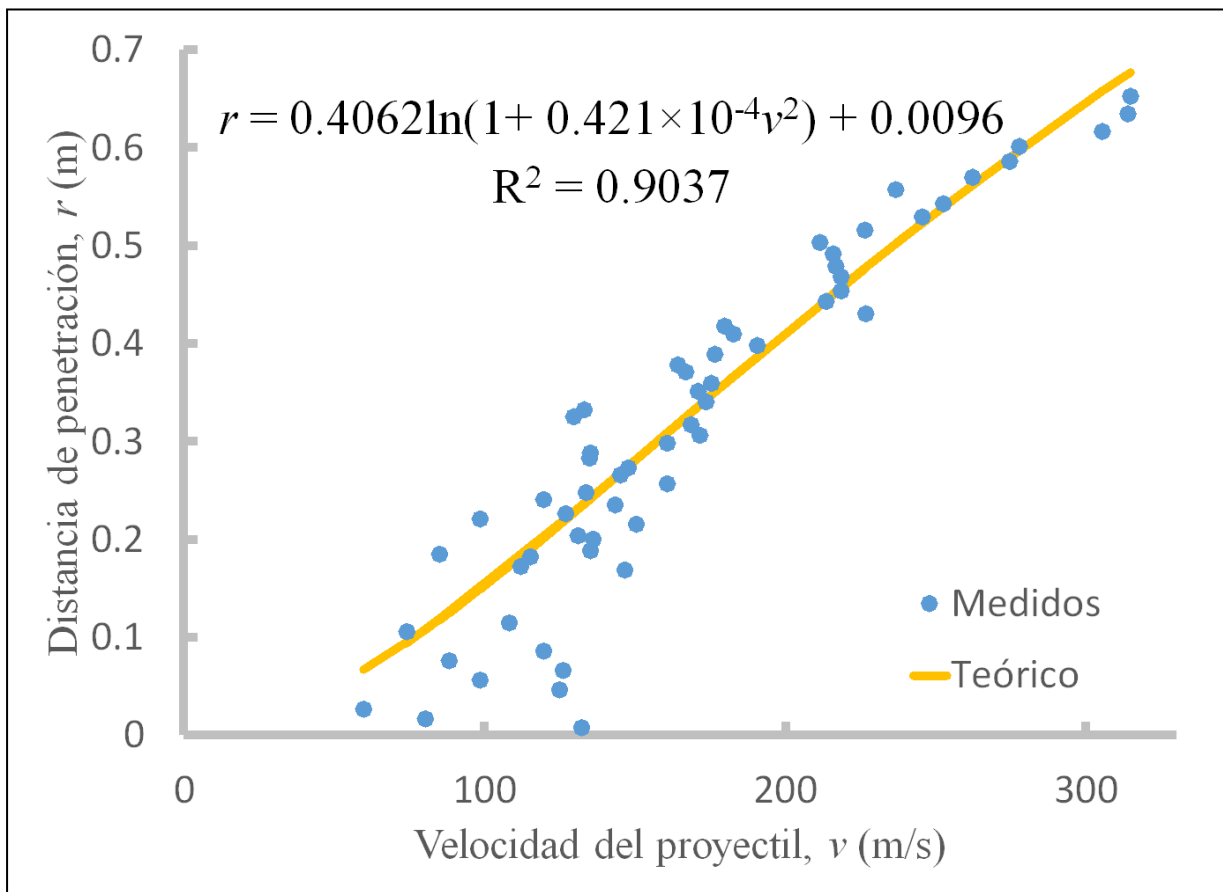


Figura 49. Gráfica de la distancia de penetración en función de la velocidad del proyectil (v), donde se muestran los datos registrados del segundo disparo con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm (puntos azules) y las distancias del modelo teórico (línea continua amarilla). La ecuación dentro de la imagen es el mejor ajuste apeándose al modelo teórico desarrollado.

Posterior al análisis correspondiente de cada una de las armas estudiadas en este trabajo (Ruger 9mm, revolver, fusil AK-47, Rifle de aire y Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm) se unieron los resultados de modo que fuese posible comparar las distancias máximas de penetración de acuerdo a la velocidad de impacto. Para sintetizar esta información se aplicó la ecuación 11 descrita en el apartado 2.4.3, así como los parámetros calculados para las variables v_T (velocidad terminal) y T (aceleración). Lo que se pretende demostrar es que cada tipo de arma producirá efectos diferentes en el proyectil hipotético disparado; se espera que aquellas armas que sí requieren pólvora para su funcionamiento y que requieren de calibres grandes, presenten una cota de penetración mucho mayor a aquellas que no utilizan ningún tipo de explosivo y que carecen de un efecto de deflagración.

En la figura 50 se observa una gráfica dividida en dos recuadros que representa las cotas de penetración. En la ventana superior (A) se observa claramente que el disparo con el fusil AK-47 alcanzó una velocidad por encima del resto de las armas utilizadas, mientras que en un segundo recuadro (B) se detallan los resultados de la relación de la penetración, donde se observa que el revólver presenta la mayor distancia de penetración, seguido por el segundo disparo con Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, Ruger 9 mm y el primer disparo con Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, consecutivamente; y por último, como se esperaba, en las pruebas desarrolladas con los rifles de aire la penetración fue la más pequeña en comparación con el resto de armas.

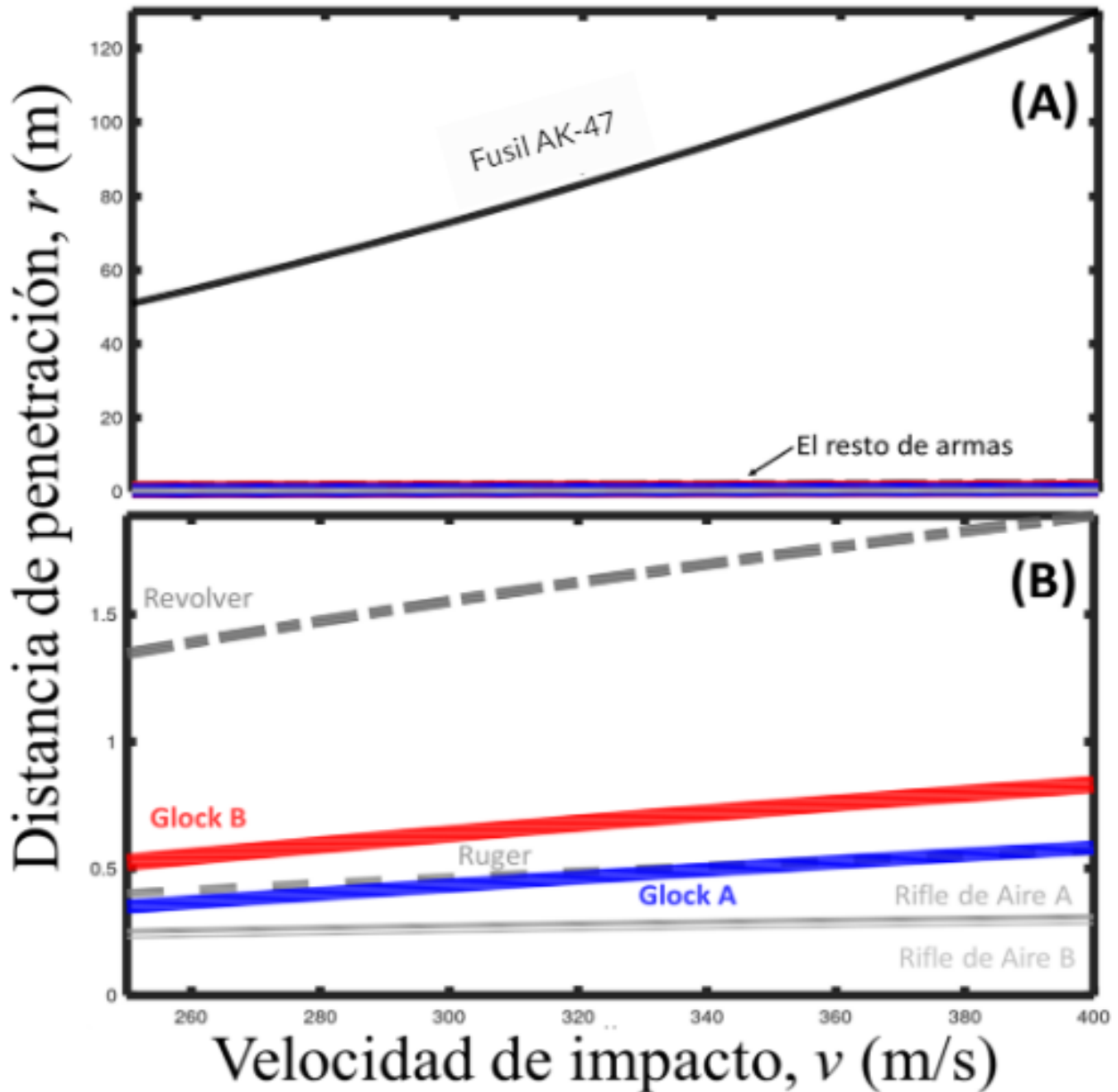


Figura 50. Comparación de penetración en función de la velocidad de impacto de las 5 armas estudiadas, utilizando la ecuación 12 y los respectivos parámetros de v_T y T . El fusil AK-47 (A) tiene la mayor penetración; en ventana (B) se observa la relación de penetración del resto de las armas. Los rifles de aire presentan la menor penetración. El intervalo de graficación corresponde a las velocidades que puede alcanzar una pistola.

Continuando con la confronta de los datos, en la figura 51 se realiza nuevamente una comparación de la distancia de penetración en función de la velocidad de impacto con los parámetros calculados de v_T y T . La línea de mayor grosor de color azul representa los datos del segundo disparo con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm (B), mientras que en cada flanco se visualizan dos líneas grises con datos combinados: la línea gris oscura en la parte superior respecto a la línea azul muestra datos del disparo 1 (A) y datos del disparo 2 (B) respectivamente, mientras que la línea gris claro por debajo de la línea azul, muestra los resultados a la inversa. El objetivo de la combinación de datos era determinar hipotéticamente, cuáles serían la cota máxima y mínima de penetración de proyectiles 9 mm cuya velocidad al momento del impacto varía entre 250 y 400 m/s.

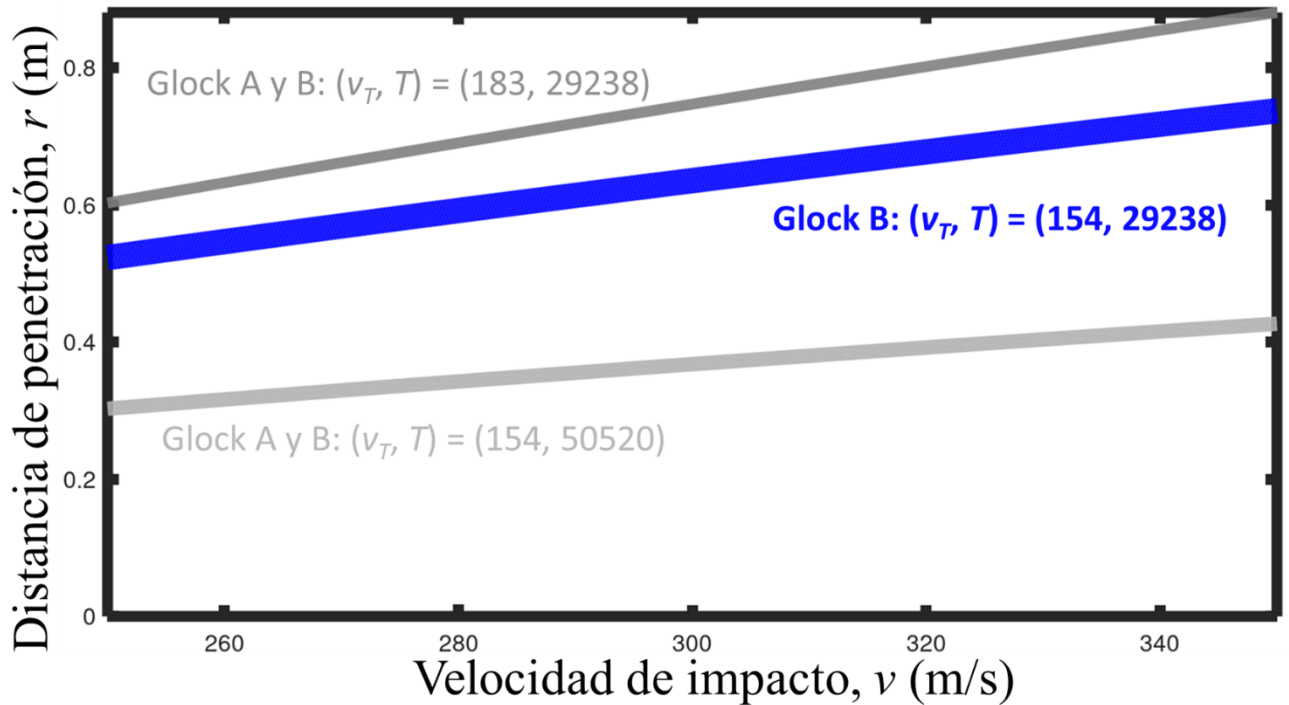


Figura 51. Comparación de gráficas de penetración en función de la velocidad de impacto con los parámetros calculados de v_T y T . La línea azul gruesa muestra los datos del segundo disparo con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm (B), en los flancos se encuentran las líneas grises con los datos combinados del primer y el segundo disparo con la Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm (A y B).

Por último, se incluyó una comparación más de la penetración en función de v_T y T respecto al segundo disparo con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, es decir, los cambios que se presentan en la velocidad del proyectil considerando las variaciones en la densidad de los medios penetrados. Ver figura 52. En la parte superior, se encuentra una línea de color gris oscuro con base en el valor de la densidad mínima del tejido graso humano, seguida por una línea gruesa color rojo que representa el gel balístico utilizado en las pruebas y por último, una línea gris clara basada en la densidad del músculo estriado esquelético. Recordando que el valor de la densidad de cada uno de estos elementos es de 812, 1005 y 1178 kg/m^3 respectivamente.

Los valores visualizados en cada flanco se consideraron debido a que representan el tejido de menor y de mayor densidad en el organismo humano, por lo que resulta congruente que el tejido adiposo que posee la menor densidad, presenta una mayor distancia de penetración, mientras que el músculo estriado al ser más denso, presenta una penetración menor.

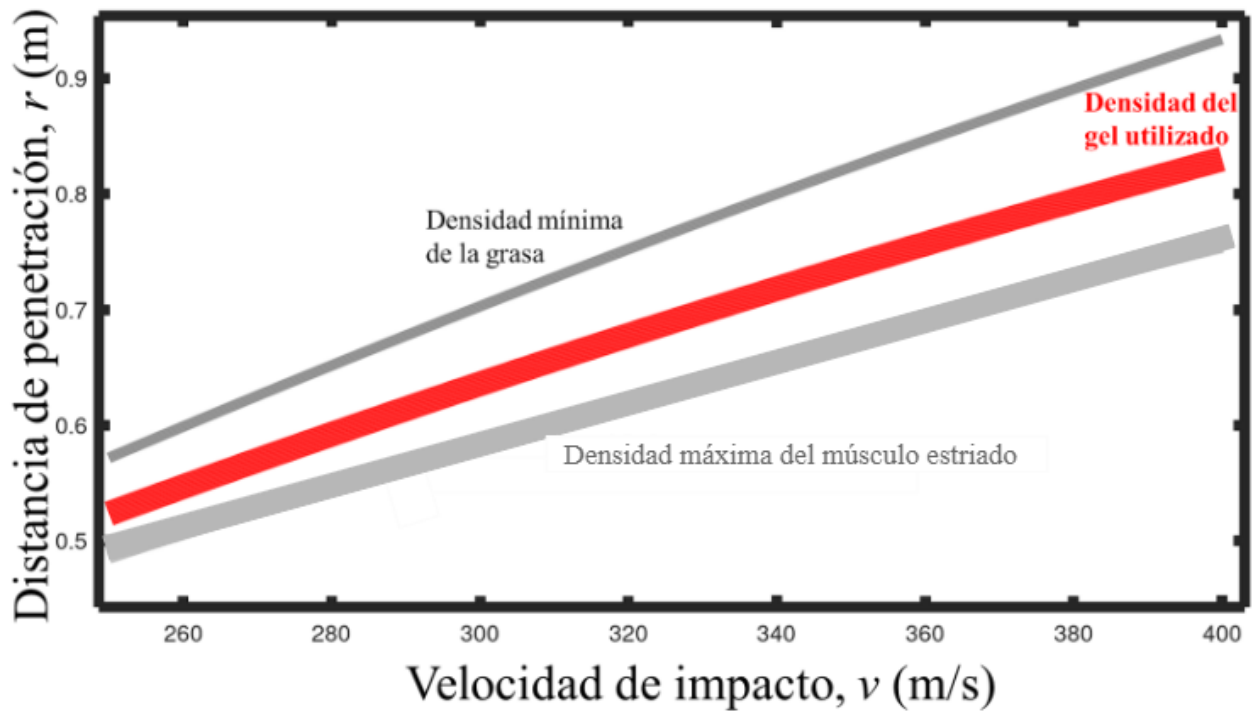


Figura 52. Comparación de gráficas penetración en función de la velocidad de impacto con los parámetros calculados de v_r y T para el segundo disparo con la pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm. La línea roja gruesa considera sólo las condiciones del gel. Pero las líneas de los flancos consideran la corrección de la densidad si se consideran los tejidos con menor densidad y el de mayor densidad.

Estos datos aportan información relevante para efectos de este trabajo, pues aterrizando los resultados al caso motivador acerca del homicidio del individuo de sexo femenino como consecuencia de una herida proveniente de un arma de fuego de un calibre 9 mm, se observa que en un intervalo de velocidades de 250 y 400 m/s (rango de velocidad alcanzada por proyectiles disparados por pistolas) la distancia de penetración puede ser mayor a los 0.75 metros en el tejido más denso y mayor a los 0.95 metros en su tejido más blando.

Tabla 11: Cálculo de alcance máximo cuando la bala impacta a 350 m/s sobre el material. En la división superior se comparan los datos combinados de los disparos de la Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm y del segundo disparo. En la división inferior se comparan los materiales con una corrección de la densidad que solo afecta a v_T . Observe que en las dos divisiones las cotas máximas y el valor central son superiores a 70 centímetros.

Nota	v_T	T	Alcance máximo (m)
Datos de Glock® A y B	183	29238	0.88
Datos de Glock® B	154	29238	0.74
Datos de Glock® B y A	154	50520	0.43
Tejido graso	171	29238	0.82
Gel balístico	154	29238	0.74
Músculo estriado	142	29238	0.67

Es importante mencionar que las pruebas experimentales de este trabajo, incluyen materiales poco convencionales a los que no es sencillo obtener acceso, por lo que fue necesaria la optimización de los datos obtenidos mediante la aplicación de una estrategia: considerar como un experimento distinto cada punto creado en el software Tracker-Physics. Por ejemplo, en el caso del segundo disparo con el arma Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm se obtuvieron 59 puntos o masas puntuales; habría sido idóneo realizar 59 disparos en 59 geles diferentes para obtener un resultado confiable basado en la reproducibilidad de la prueba; sin embargo, no resultaba viable para fines de este trabajo, por lo que cada una de las 59 masas puntuales se consideró como si fuese el último punto marcado del trayecto del proyectil o bien, la distancia máxima de penetración.

4.2.1 ANÁLISIS DE PROYECTILES

Las dos pruebas balísticas realizadas con la Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm se llevaron a cabo bajo condiciones muy similares utilizando la misma arma de fuego y por lo tanto, cartuchos calibre de 9 mm provenientes de la misma serie. Las balas fueron recuperadas del interior del gel balístico (primer disparo), y del stand de tiro tras el impacto con una de loseta de caucho, (segundo disparo) pues generó un orificio de salida, provocando que abandonara el bloque de gel. Como se observa en la figura 53, ninguno de los proyectiles presenta daños o deformaciones significativas a simple vista. Esta misma observación sucedió en el caso motivador de este trabajo.

Como se mencionó anteriormente en el apartado 2.2 de esta tesis, las deformaciones de la punta de una bala se deben a dos factores: la velocidad a la que viaja el proyectil y la profundidad de penetración alcanzada.



Figura 53. Fotografía de las balas recuperadas de las pruebas con pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm. Bala del lado izquierdo: utilizada en el primer disparo, permaneciendo en el interior del gel balístico; bala del lado derecho: utilizada en el segundo disparo, abandonó el gel balístico.

Para efectos de esta tesis, resultaba más conveniente utilizar una bala “lenta” que permitiera la observación y análisis de su comportamiento en el interior del medio penetrado. En este caso, el proyectil no sufrió deformaciones considerables, lo que se debe a que la velocidad que alcanzó fue menor a los 600 m/s. El proyectil que permaneció en el interior del bloque de gel, alcanzó una penetración de 92 cm. Esta gran longitud se debe a que las puntas redondeadas y/o los núcleos de plomo de las balas, permiten que el canal de la herida que se produzca sea largo, pero con una dimensión pequeña, por lo que el uso de un proyectil de tipo deformante no resultaría viable si lo que se desea es alcanzar una cota de penetración de gran longitud.

Cabe mencionar que otro factor que influye en la ausencia de deformación de los proyectiles, se debe a que el medio a través del cual se desplazaron presenta una resistencia muy baja debido a que su densidad es mucho menor en comparación con los materiales que componen la bala, específicamente, los metales que son utilizados para el recubrimiento de la punta.

CAPÍTULO 5.

CONCLUSIONES Y PROSPECTIVA

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el análisis de las tendencias de datos empíricos, la cota máxima de penetración de un proyectil calibre 9 mm Parabellum disparado por una pistola Glock® modelo 17 calibre 9 x 19 mm, es de 0.82 m en el tejido humano más blando (tejido adiposo) y 0.67 m en el tejido más denso (músculo estriado).
- 2.- Los dos disparos que se realizaron en el interior del gel balístico con arma de fuego muestran que un proyectil puede alcanzar ajustes de línea superiores a (R^2) 0.9 al comparar el modelo de penetración balística y los datos medidos en los vídeos, lo que resulta congruente toda vez que supera valores entre (R^2) 0.7 - 0.8 alcanzados en las pruebas con armas de aire.
2. Derivado de las gráficas obtenidas de la distancia en función de la velocidad proveniente del disparo de un arma Glock® 9 mm, puede observarse que existe un mejor ajuste de puntos cuando la velocidad del proyectil oscila entre los 250 y 400 m/s, por lo que proyectiles lentos no son viables para este tipo de estudios.
3. Los resultados obtenidos mediante las experimentaciones desarrolladas son confiables por su coherencia e incertidumbres asociadas al 20%. Sin embargo, no debe omitirse que este trabajo muestra únicamente perspectivas y acercamientos de una investigación en el ámbito de la balística forense, pues las variables presentes en casos reales que involucran heridas o muertes provocadas por armas de fuego, dificultan el principio criminalístico de reconstrucción de hechos.

PROSPECTIVA

1. Es importante obtener el máximo provecho de herramientas y dispositivos tecnológicos como las cámaras de video ultra rápidas o el sistema *Anatmage-table* para complementar una investigación relacionada con la balística de heridas. Un área de oportunidad relacionada con la herramienta *Anatmage-table* podría ser una ampliación en el catálogo referente a las características de los maniqués virtuales, de modo que fuese posible adaptar complexiones, estaturas y posturas del maniquí; incluso, que pudiera obtenerse una vista en la que se muestre con mayor detalle el viaje del dispositivo de grabación, permitiendo la observación del trayecto del proyectil a través de los tejidos dañados.
2. Resultaría conveniente el desarrollo de más pruebas utilizando gel balístico y la cámara ultra rápida, pero modificando la variable del tipo de armas utilizadas. Particularmente, sería de gran interés llevar a cabo pruebas balísticas con el arma AK-47, pues de acuerdo a los resultados en esta tesis, parece presentar valores excesivos en términos de distancia de penetración.
- 3.- Para futuros trabajos en materia de balística forense, sería apropiado el estudio microscópico de los daños que permanecen en un proyectil de arma de fuego que son recuperados posterior al impacto y penetración en maniqués biológicos de densidades iguales o similares a las presentes en los tejidos biológicos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] (2021). *Índice de Paz de México 2021*. Recuperado el 10 de marzo de 2022, de Instituto para la Economía y la Paz Sitio web: <https://www.indicedepazmexico.org/>
- [2] (2021) *Ley Federal de Armas de Fuego y Explosivos*. Recuperado el 10 de junio de 2021, de la Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de enero de 1972. Sitio web: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/102_190221.pdf
- [3] (2016) *Artículo 10. Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos*. Recuperado el 10 de diciembre de 2021, del Diario Oficial de la Federación. Sitio web: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/431912/1_cpeum.pdf
- [4] (2017). *Manual para la Capacitación y Evaluación de Competencias Básicas de la Función para los Integrantes de las Instituciones de Seguridad Pública*. Recuperado el 18 de octubre de 2020, de Secretariado Ejecutivo del Sistema Nacional de Seguridad Pública. Sitio web: <https://www.gob.mx/sesnsp/documentos/manuales-para-la-capacitacion-y-evaluacion-de-los-integrantes-de-las-instituciones-de-seguridad-publica>
- [5] Miranda, J. (2019). *Pistola usada en Cuernavaca “se fugó “de fiscalía*. Recuperado el 05 de noviembre de 2020, de El Universal. Sitio web: <https://www.eluniversal.com.mx/estados/pistola-de-homicidios-en-morelos-usada-antes-para-impedir-un-robo>
- [6] (2021). *Firearms Trace Data: México - 2015-2020 Data Source: Firearms Tracing System*. Recuperado el 30 de marzo de 2022, de ATF. Sitio web: <https://www.atf.gov/resource-center/firearms-trace-data-mexico-2015-2020>
- [7] (2011). *Manual de buenas prácticas en balística forense*. Recuperado el 07 de febrero de 2022, de Grupo Iberoamericano de Trabajo en Balística Forense (GITBAF). Sitio web: <https://www.mp.hn/Forense/documentos-07/>
- [8] (2021) *Arma*. Recuperado el 21 de agosto de 2021, de la Real Academia Española. Sitio web: <https://dle.rae.es/arma>
- [9] (2021). *Convención Interamericana contra la fabricación y el tráfico ilícito de armas de fuego, municiones, explosivos y otros materiales relacionados*. Recuperado el 19 de agosto de 2021, de Organización de los Estados Americanos. Sitio web: http://www.oas.org/es/sla/ddi/tratados_multilaterales_interamericanos_A-63_fabricacion_trafico_ilicito_armas_municiones_explosivos.asp
- [10] Nelson Alejandro Ramírez Velázquez. (2014). *Aspectos Selectos en Balística Forense*. Diciembre 2020, de Trillas.
- [11] (2017). *Clasificación de las armas de fuego*. Recuperado el 10 de diciembre de 2020, de Seguridad Integral Empresaria. Sitio web: <https://siesa.com.ar/clasificacion-de-las-armas-de-fuego/>
- [12] *¿Qué es la OTAN?*. Recuperado el 17 de enero de 2022, de OTAN/NATO Sitio web: https://www.nato.int/nato-welcome/index_es.html?fbclid=IwAR1On_HM3xz_MobgWyd0Pu3_JDOW_lwlrqhe5jkCCFaBTF_zGFnhSAVVKpl
- [13] Hogg, I, Walter. J. (2004). *Pistols of the World. The Definitive illustrated Guide to the World's Pistols and Revolvers*, Tercera edición, Editorial Gun Digest Books
- [14] Natarén Nandayapa C., Ramírez Saavedra B. . (2019). *Desafíos del sistema penal acusatorio - La investigación en el nuevo sistema de justicia acusatorio y oral. Elementos en el caso de delitos cometidos con arma de fuego*. Recuperado el 20 de enero de 2022, de la Universidad Nacional Autónoma de México - Instituto de Investigaciones Jurídicas. Desafíos del sistema penal acusatorio.
- [15] Pomponio. S, Fenoy. B. (2018). *Identificación de la marca de una pistola a partir del hoyo de percusión*, de la Revista Skopein - Criminalística y Ciencias Forenses.
- [16] Ccaza Zapana. J.E.(2013). *Diccionario elemental de criminalística, criminología y ciencias forenses*. Editorial Flores
- [17] Contreras, Citlali. (2018). *La balística de heridas*. Recuperado el 07 de diciembre de 2020, de Revistas jurídicas UNAM, UNAM. Sitio web: <https://revistas.juridicas.unam.mx/index.php/hechos-y-de-rechos/article/view/12990/14535>
- [18] Anturi, L.E.R., Zambrano, J.N., & Blanco, N.E.E. (2014). *Distancia de disparo y su interpretación frente a la conducción de hostilidades en el conflicto armado colombiano*. Recuperado el 25 de noviembre de 2019, de Revista científica General José María Córdova, Vol. 12, p.291. Sitio web: <https://doi.org/10.21830/19006586.164>
- [19] (2021). *Heridas por arma de fuego*. Recuperado el 06 de diciembre de 2021, de la Universidad Veracruzana. Sitio web: <https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-veracruzana/medicina-legal/heridas-por-arma-de-fuego/2344272>
- [20] (2022). *Comité Internacional de la Cruz Roja*. Recuperado el 14 de febrero de 2022, de Comité Internacional de la Cruz Roja Sitio web: <https://www.icrc.org/es>
- [21] (2018). *Qué es la energía cinética: definición*. Recuperado el 27 de marzo de 2022, de Universidad Internacional de Valencia. Sitio web: https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/que-es-la-energia-cinetica-definicion?fbclid=IwARIS_HOK50OmjEL3EKHBrC_7DRLtRH0pDsAVIRB_L7U2HnO-ly4wk3Q-xL_w
- [22] (2018). *El fenómeno físico de la cavitación*. Recuperado el 14 de diciembre de 2021, de Montajes Soluciones Ingeniería. Sitio web: <https://www.ms-ingenieria.com.mx/ingenieria-mecanica/el-fenomeno-fisico-de-la-cavitacion>

- [23] *User Manual Chronos 1.4 & Chronos 2.1-HD*. Recuperado el 06 de noviembre de 2021. Sitio web: <https://www.krontech.ca/wp-content/uploads/2021/09/RE-PDEV-10009-Chronos-User-Manual-Full-Software-Version-0.7.0.pdf>
- [24] (2015) *Anatontage Table EDU 4.0 User 's Manual*. Recuperado el 14 de febrero de 2021. Sitio web: <https://www.anatomie.uni-kiel.de/de/lehre/makro/virtuelle-makroskopie/TableEDU4.0-Application-Users-Manual.pdf>
- [25] Güido, C, Ortiz. J. (2022). *El sensor fotográfico*. Recuperado el 17 de julio de 2020, de Escuela Nacional Preparatoria N° 7, UNAM Sitio web: <https://fotografia.ceduc.com.mx/el-sensor-fotografico/>
- [26] Vollmer. M y Möllmann.K. (2011). *High speed and slow motion: the technology of modern high speed cameras*. Recuperado el 26 de marzo de 2021. Sitio web: <https://www.semanticscholar.org/paper/High-speed-and-slow-motion%3A-the-technology-of-high-Vollmer-M%C3%B6llmann/185aa1d6c440556b38cf2ddcacb942f6d9b0298e>
- [27] W.W. Fuller Peter (2020). *Some Highlights in the History of High-Speed Photography and Photonics as Applied to Ballistics*. Recuperado el 27 de marzo de 2021, de SpringerLink. Sitio web: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/3-540-27168-6_7.pdf
- [28] García G. P., Deichler.F.V. y Torres.E.E. (2011). *Lesiones por armas de fuego desde la perspectiva médico-criminalística*. Recuperado el 28 de octubre de 2020, de Revista Chilena De Cirugía, 63(3), 327-331. Sitio web: <https://doi:10.4067/s0718-40262011000300017>
- [29] Kneubuehl B. P. (Ed.) et al. (2011). *Wound Ballistics*. Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- [30] Fonseca, Gabriel M. (2019). *Atypical entrance and exit wounds due to high velocity bullet with intraoral position. Suggested procedures in Forensic Oral Pathology*. Recuperado el 12 de octubre de 2021, de Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Córdoba (Argentina) Sitio web: <https://scielo.isciii.es/pdf/cmfn57/original3.pdf>
- [31] Fowles, G. R. and Cassiday, G. L., *Analytical Mechanics*, Secc. 2.4, Quinta edición., Saunders College Publishing
- [32] Peña, E; Centeno, A; Cordido, F; Falcón, N, (2013) *Modelo colisional para la penetración de proyectiles sobre un plano semi-infinito*. Revista Ingeniería UC, Vol 20, No 1.
- [33] (2018). *Tissue Properties "Density"*. [Tabla] Recuperado el 15 de noviembre de 2020, de IT'IS Foundation. Sitio web: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/data-base/density/>
- [34] Nave, Carl R. *Hyperphysics*. Recuperado el 18 de abril de 2022. Sitio web: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Mechanics/quadvise.html#c1>
- [35] Lipschutz, S., Spiegel, M. R., & Liu, J. (2012). *Schaum's Outline of Mathematical Handbook of Formulas and Tables: 2,400 Formulas & Tables*. McGraw Hill Professional.
- [36] Torres-Zúñiga, V., & Muñetón, J.G.B. (2017). *Cálculo de la distancia máxima que justifica utilizar el modelo lineal en una reconstrucción de trayectoria balística*. Revista Brasileira de Criminalística
- [37] *Conector BNC*. Recuperado el 08 de enero de 2022, de Delta. Sitio web: https://shopdelta.eu/conector-bnc_l6_aid762.html?fbclid=IwAR3mbu54Xmyj9FCAvPPOBE3MCAignuSdeOA7fiZxDLuP2cXIWabRlv-314E#:~:text=Los%20conectores%20BNC%20facilitan%20la,el%20conector%20hacia%20la%20toma]
- [38] (2021). *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. Recuperado el 08 de diciembre de 2021, de Open Source Physics. Sitio web: <https://physlets.org/tracker/?fbclid=IwAR3oUFpPAYsoatKtNMK4R0Tz2toFVa0sEwSSsIXiR-NA439bykaJZHOEs>
- [39] *Manual de usuario de Tracker*. Recuperado el 27 de marzo de 2022, de Tracker Sitio web: https://physlets.org/tracker/tracker_help.pdf
- [40] The Slow Mo Guys. (2014). *Underwater Bullets at 27,000fps*. 10 de diciembre de 2021, de YouTube Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=OubvTOHWTms&t=92s>
- [41] Smarter Every Day. (2014). *AK-47 Underwater at 27,450 frames per second (Part 2)*. 12 de diciembre de 2012, de YouTube Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=cp5gdUHFGIQ>

APÉNDICE

GLOSARIO

Aberración óptica: en el ámbito de la fotografía, se trata de una deficiencia óptica de un objetivo que provoca falta de nitidez o deformaciones en las imágenes. Este problema aparece debido a que la lente no es capaz de proyectar todas las longitudes de onda de color al mismo plano focal o bien, cuando dichas longitudes se encuentran enfocadas en distintas posiciones dentro del plano focal.

Acrílico: polímero termoplástico obtenido de la polimerización del monómero de metacrilato, material que es fundido para ofrecerlo en diversas presentaciones. Comparado con el vidrio es hasta 5 veces más resistente, casi un 50% más ligero, y tiene mayor cantidad de usos, colores y texturas.

Alcoholemia: cantidad de alcohol presente en sangre debido a la ingesta de bebidas alcohólicas. El índice de alcoholemia varía por factores como el sexo y el peso del individuo. En cantidades bajas que oscilan entre los 0.05 y 0.15 g/dl provoca efectos como embriaguez y euforia; en cantidades entre 0.15 y 0.3 g/dl se manifiesta con náuseas, vómitos, problemas visuales y de equilibrio y dificultad de elocución. Cuando el nivel de alcohol en la sangre rebasa los 0.3 g/dl, puede presentarse un coma etílico e incluso, la muerte.

Bloom: fuerza gelificante o rigidez de cuajado o de un gel. La cantidad de grados Bloom de un gel es directamente proporcional a su tiempo de resistencia a temperatura ambiente.

Coefficiente de arrastre: fuerza que se presenta cuando un objeto se mueve a través de un fluido, como puede ser el aire o el agua, en donde el fluido ejerce una fuerza de resistencia, provocando así una reducción en la velocidad del objeto que se encuentra en movimiento.

Cohesión: conocida como fuerza intermolecular, se refiere a la tendencia de un líquido a permanecer como un conjunto de partículas.

Cota: valor numérico que en los planos expresa la distancia que separa dos elementos. En este sentido, la cota máxima y mínima representan las medidas máximas y mínimas permisibles en un ambiente delimitado.

Cruz Roja: Movimiento Internacional cuya misión es prevenir y aliviar el sufrimiento humano; proteger la vida y la salud, y hacer respetar a la persona humana, en particular en tiempo de conflicto armado y situaciones de urgencia. Esta organización independiente y neutral toma medidas para responder a las emergencias y promueve, al mismo tiempo, el respeto del derecho internacional humanitario y su aplicación en la legislación nacional.

Densidad: propiedad intensiva de la materia definida como la relación de la masa de un objeto dividida por su volumen. Por consiguiente, las unidades comunes usadas para expresar la densidad son gramos por mililitros (g/ml) y gramos por centímetros cúbicos (g/cm³). La densidad describe cuán unidos están los átomos de un elemento o las moléculas de un compuesto: mientras más unidos están las partículas individuales de una sustancia, más densa es la sustancia.

Diafragma:

- Anatomía - Estructura musculotendinosa que separa la cavidad torácica (pulmones y corazón) de la cavidad abdominal (intestinos, estómago, hígado, etc.). Se contrae y relaja, alterando el volumen de la cavidad torácica y los pulmones, produciendo inspiración y expiración.
- Fotografía - Parte del objetivo de las cámaras fotográficas que se encarga de limitar la cantidad de luz que penetra. El diafragma se abre o se cierra de acuerdo a la cantidad de luz que se requiera. La apertura de esta estructura se mide en números *f*.

Elasticidad: propiedad de ciertos materiales de ser deformados bajo una fuerza externa que actúa sobre ellos y, posteriormente, recuperar su forma original una vez que dicha fuerza desaparece.

Explosivo: materiales y objetos que desprenden gases a una temperatura o velocidad capaces de producir daños a través de una reacción química exotérmica.

Extravasación hemática: escape o salida no intencionada de plasma de los vasos sanguíneos hacia el tejido y espacio intersticial que lo rodea. Es el resultado de altas presiones osmóticas o roturas de las paredes de los vasos sanguíneos.

Forma helicoidal: cualquier figura geométrica con forma de hélice, similar al espiral o la línea curva tangente que forma un ángulo constante.

Fuerza: magnitud vectorial que mide la intensidad del intercambio de momento lineal entre dos cuerpos. La unidad de medida de fuerza es el newton que se representa con el símbolo *N*.

Fuerza de gravedad: es una de las cuatro fuerzas o interacciones fundamentales responsables de todos los fenómenos que ocurren en el Universo. Actúa sobre todas las partículas con masa y tiene un alcance prácticamente infinito. Esta fuerza es capaz de modificar el estado de un cuerpo debido a la atracción que la Tierra u otro cuerpo celeste ejerce sobre los cuerpos cercanos o sobre él, originando una aceleración. La Ley de la Gravitación Universal propuesta por Isaac Newton establece que la fuerza ejercida por una partícula puntual con una masa determinada (m_1) sobre otra partícula con masa su propia masa (m_2) es directamente proporcional al producto de las masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de separación.

Fuerza impulsora: en la transmisión de energía la fuerza impulsora es una diferencia de temperatura y en el transporte de cantidad de movimiento, se refiere a una diferencia de velocidad entre dos zonas del fluido.

Fuerza tipo Rayleigh: Se trata de una fuerza de arrastre producida por efectos de viscosidad de un objeto moviéndose dentro de un entorno, esta tendrá mayor importancia de acuerdo a la velocidad relativa y condiciones de los materiales.

Grains: unidad de medida de masa del sistema inglés. Se utiliza como medida estándar para mediciones de cargas de pólvora de proyectiles. Un grain equivale a 0,06479891 gramos, es decir, un gramo equivale a 15,4324 grains. Un proyectil con más grains tendrá una mayor caída cuando empiece a perder energía/velocidad.

Grenetina: proteína de origen animal obtenida de procesos de hidrólisis ácidas o alcalinas del colágeno presente en pieles, huesos y diversos tejidos animales. Contiene 85% de proteínas, 12% de agua y 1-2% de sales. Suele encontrarse en el mercado como polvo fino de color ligeramente amarillento

Hemitórax: el “tórax” es el término médico para la zona del pecho, por lo que el hemitórax indica sólo la mitad del pecho; cada hemitórax sirve como hogar y la protección de los órganos en el pecho. El hemitórax izquierdo contiene el corazón y el pulmón izquierdo.; el pulmón derecho es básicamente el único órgano que contiene el solo en el hemitórax derecho, por lo que presenta un mayor tamaño que el pulmón izquierdo.

ISO: la sensibilidad ISO en fotografía es un conjunto de parámetros que determinan la cantidad de luz captada por el sensor de la cámara. Una ISO baja requiere mayor cantidad de luz para lograr una buena exposición, mientras que una ISO alta presenta mayor sensibilidad, por lo que necesita menos luz para una buena exposición.

Lesión equimótica: ruptura de vasos sanguíneos de la dermis, produciendo infiltraciones hemáticas localizadas. Como consecuencia, se forman placas que varían en tamaño y color dependiendo de la temporalidad de la lesión. Se clasifica como una lesión de carácter “vital” debido a que se requiere la presencia de circulación sanguínea para su producción.

Lesión excoriativa: destrucción de estratos basales de la epidermis como resultado de un traumatismo. Tras un lapso entre 7 y 14 días, ocurre un desprendimiento de una costra, indicando la restitución del tejido. Al igual que las lesiones equimóticas, requieren circulación sanguínea para manifestarse.

Microscopio de comparación balística: unión de dos microscopios estereoscópicos conectados entre sí por un puente óptico. Permite la visualización de dos elementos balísticos de manera simultánea para facilitar su comparación. Del lado izquierdo se coloca la muestra testigo y del lado derecho, la muestra problema.

Módulo de Young: también conocido como módulo de elasticidad, es una constante ante los cambios lineales producidos en un material cuando se le aplica una fuerza de tracción o de compresión a nivel externo. Este parámetro indica la rigidez de un material, pues entre más rígido sea, mayor será el valor de su módulo de elasticidad; por lo cual es único y caracteriza cada material de acuerdo a sus propiedades.

Músculo estriado esquelético: como su nombre lo indica, presenta estriaciones y la mayor parte de él se asocia al esqueleto, pues funciona bajo control voluntario toda vez que se encuentra inervado por el sistema nervioso somático. Está constituido por largas células multinucleadas, cuyos núcleos se localizan en la periferia. Este tipo muscular se encuentra en lengua, faringe, segmento superior del esófago y porción lumbar del diafragma.

Músculos intercostales: grupo de músculos de tipo esquelético en la caja torácica que se encuentran entre las costillas, por lo que constan de 11 tríos de músculos. Tienen el único propósito de expandir y contraer la caja torácica y se dividen en 3 grupos: externos (facilitan la inspiración forzada) internos e íntimos (facilitan la espiración forzada).

Músculo liso: células de forma alargada, uninucleadas y delgadas, organizadas en varias capas. Los músculos lisos se contraen espontáneamente y lentamente, bajo el efecto de la miosina y la actina; su función es asegurar el transporte de compuestos como la sangre o el aire y están situados a nivel de las arterias, del tubo digestivo, del aparato respiratorio, del sistema urinario y genital.

OTAN: Organización del Tratado del Atlántico Norte. Alianza entre países europeos y norteamericanos cuyo objetivo es garantizar la libertad y seguridad de sus países miembros a través de medios políticos y militares. Busca solventar problemas, fomentar confianza y, a largo plazo, evitar conflictos.

Parabellum: término proveniente del latín *bellum* (guerra); entonces su significado es “para la guerra”.

Percusión: acción del martillo de un arma sobre el fulminante, produciendo una chispa que permite el encendido de la pólvora y, por lo tanto, deflagración de los gases.

Plasticidad: propiedad mecánica de un material, biológico o de otro tipo, de deformarse permanentemente e irreversiblemente cuando se encuentra sometido a tensiones por encima de su rango o límite elástico.

Presión: magnitud física que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie. Se define como la derivada de la fuerza con respecto al área.

Presión atmosférica: presión ejercida por la atmósfera que rodea la tierra sobre todos los objetos en contacto con ella. Es la presión absoluta de la atmósfera en un punto e instante dado, ya que este valor se ve modificado dependiendo de diversas condiciones atmosféricas y de la altura sobre el nivel del mar.

Radián: es el ángulo que aparece cuando la longitud del arco de la circunferencia, mide lo mismo que el radio.

Reducción de la luz: aberración en sistemas ópticos conocido como (*light fall-off*). Se refiere a un oscurecimiento de las esquinas de la imagen en comparación con su brillo central, producido por el bloqueo por parte del objetivo de los rayos marginales.

Resistencia aerodinámica: es la fuerza opuesta al movimiento de un sólido al moverse a través del aire. Esta magnitud tiene signo positivo cuando va en el sentido del flujo, mientras que se presenta con un signo negativo si el objeto se mueve contra del flujo debe vencer a esta fuerza opositora al avance.

SEDENA: Secretaría de la Defensa Nacional. Organismo perteneciente al poder Ejecutivo, cuyas funciones principales son la organización y entrenamiento de las fuerzas armadas, la defensa del país y ayudar a la sociedad civil.

Tiempo de vuelo: también conocido como TOF por sus siglas en inglés “time-of-flight” es el tiempo total que permanece en el aire un proyectil para desplazarse de un punto inicial hasta un punto final que puede ser el suelo o un objetivo que produzca el frenado del proyectil.

Velocidad: magnitud física que expresa el espacio recorrido por un móvil en la unidad de tiempo, y cuya unidad en el sistema internacional es el metro por segundo (m/s).

Velocidad angular: el movimiento rotacional se describe en términos cinemáticos por la velocidad angular, con desplazamiento angular (M) medido en radianes. Una revolución completa corresponde a 2π radianes, lo que equivale a 360° .

Velocidad circunferencial: movimiento que toma en cuenta el número de giros de un objeto en el tiempo, pero no la distancia recorrida, pues permanece fija.

Velocidad lineal: en el ámbito balístico, se refiere al movimiento de traslación que lleva a cabo un proyectil durante su trayectoria y/o trayecto.

Velocidad de rotación: movimiento que lleva a cabo un proyectil sobre su propio eje durante el tiempo de vuelo y en algunos casos, al penetrar su blanco. Este movimiento es suministrado por el estriado del cañón y presenta valores inferiores a la velocidad lineal de una bala.

Velocidad terminal: velocidad constante que alcanza un objeto que cae mientras atraviesa un medio resistivo sobre el cual, actúa una fuerza constante.