



SABER, arte y técnica

Minerva. Saber, arte y técnica

AÑO 9 • VOL. 1 • JUNIO 2025

Dossier Ciencias Forenses Aplicadas

ISSN en línea 2545-6245

ISSN impreso 2591-3840

Sistema iForenLIBS: Aplicación a casos reales

JOSÉ ANTONIO RODRÍGUEZ-PASCUAL*

Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Policiales (IUICP), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España

jarpascual1@gmail.com

ALICIA DOÑA-FERNÁNDEZ**

Sistema de Defensa y Seguridad (Indra), Madrid, España

aliciadonafernandez1@gmail.com

RECIBIDO: 13 de marzo de 2025

ACEPTADO: 6 de mayo de 2025

Resumen

iForenLIBS es una innovadora herramienta forense basada en la tecnología LIBS (Espectroscopia de Ruptura Inducida por Láser). Se utiliza tanto en la detección de residuos de disparo (GSR) como en la estimación de distancias a las que se han producido. Su capacidad de análisis *in situ*, sin preparación previa de la muestra, alta sensibilidad y portabilidad, lo han convertido en una herramienta de gran utilidad en la balística forense a nivel operativo. Aporta rapidez y objetividad a partir del análisis elemental de las partículas que se encuentran en las distintas superficies de forma automatizada tanto en laboratorio como en las escenas del delito. Se presentan dos casos reales como ejemplo de aplicación del sistema. En el primer caso, se muestran los resultados obtenidos del análisis de varias lesiones en una prenda de vestir. Tras el análisis directo sobre la evidencia, se determinó que fueron causadas por arma de fuego permitiendo estimar tanto la dirección como la distancia de disparo. En segundo lugar, se presenta la posibilidad del uso del sistema para verificar las zonas de impacto efectuadas por un arma blanca. Tras realizar una extracción mediante un adhesivo de los elementos que se encontraban en la superficie, analizar y valorar los resultados, fue posible correlacionar los elementos químicos encontrados en el escudo policial con el cuchillo que las produjo.

Palabras clave: iForenLIBS; Espectroscopia de Ruptura Inducida por Láser; LIBS; partículas GSR; casos reales

iForenLIBS System: Application to Real Cases

Abstract

iForenLIBS is an innovative forensic tool based on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) technology. It is used for the detection of gunshot residues (GSR) and the estimation of shooting distances. Its capability for *in situ* analysis, without prior sample preparation, high sensitivity, and portability have made it a highly valuable tool in operational forensic ballistics. It provides rapid and objective results through the elemental analysis of particles found on various surfaces, performed automatically in both laboratory settings and at crime scenes. Two real case studies are presented as examples of the system's application. In the first case, the results obtained from the analysis of several injuries on clothing are shown. Following direct analysis of the evidence, it was determined that these injuries were caused by a firearm, allowing for the estimation of both the direction and distance of the shot. Furthermore, the potential use of the system to verify the impact zones made by a bladed weapon is demonstrated. After extracting elements from the surface using an adhesive element and analyzing the results, it was possible to correlate the chemical elements found on the police shield with the knife that produced the injuries

Keywords: iForenLIBS; Laser-induced breakdown spectroscopy; LIBS; GSR particles; real cases

1. Introducción

Los incidentes en los cuales intervienen armas de fuego han sufrido un importante incremento en la actualidad. Su investigación puede llegar a ser muy compleja, especialmente aquellas en las que intervienen varios agresores con diferentes armas y distintos tipos de munición, llegando a originar, en multitud de ocasiones, múltiples víctimas. En estos escenarios, establecer qué munición empleó cada tirador, localizar rebotes/disparos intermedios, estimar el ángulo de impacto y/o la distancia de disparo, puede llevar a la identificación del posible tirador, posicionarlo con respecto a la víctima y a la resolución del caso (Chisum y Turvey, 2011; Vachon y Martínez, 2019).

En la actualidad están surgiendo nuevas herramientas, tanto para uso en la propia escena del crimen como incorporándose en los sistemas de análisis de los laboratorios forenses (Esposito *et al.*, 2023). Durante la inspección ocular balística es importante identificar los diferentes elementos o evidencias que pueden hallarse en este tipo de escenarios (Teng *et al.*, 2024), ya sea a nivel macroscópico: armas, proyectiles, vainas y fragmentos, o a nivel microscópico: residuos de disparo (Saverio Romolo y Margot, 2001). Dentro de este último grupo, es necesario diferenciar entre las partículas definidas como residuos de disparo (ASTM, 2020) y los considerados restos de disparo. Esta diferenciación



se realiza con el fin de distinguir entre los elementos químicos que provienen de la detonación (iGSR - fulminante y oGSR - pólvora), cuyo alcance no suele superar los 2,5 metros en el caso de armas cortas, y aquellos que se producen por la transferencia de los componentes de la bala (blindaje o núcleo) a la superficie en el momento del impacto, los cuales dependen, principalmente, de la densidad de los diferentes materiales que los constituyen (Rodríguez *et al.*, 2025).

Una de las principales técnicas de análisis que ha evolucionado notablemente en el ámbito de la balística forense es la tecnología LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) o espectroscopía de ruptura inducida por láser. Como descripción general, se trata de una técnica analítica espectroscópica basada en la ablación de la materia. Un láser de alta intensidad es enfocado en la muestra que se desea analizar generando un plasma a alta temperatura. Este plasma contiene iones y átomos en estado excitado, lo que lo convierte en una fuente de radiación lumínica. A medida que dicho plasma se enfría, los átomos y iones excitados emiten radiación a longitudes de onda específicas características de cada uno de los elementos presentes. La luz es captada usando sistemas ópticos y analizada mediante espectrómetros. El estudio del espectro generado permite identificar la composición de la muestra, considerándose como la huella dactilar de la misma. Esta tecnología se suele utilizar en aplicaciones que requieren análisis químicos rápidos y precisos, tanto en sólidos, líquidos o gases (Singh *et al.*, 2011).

LIBS se diferencia de otras técnicas analíticas por una serie de ventajas que la han convertido en es una herramienta versátil para el análisis químico en diversas aplicaciones científicas, entre las que destacan las industriales (Zhang *et al.*, 2021) y las forenses (Castillejo, 2000; Bridge, 2007; Lucena *et al.*, 2011; Brunnbauer *et al.*, 2023), especialmente en el campo de la balística (Goode, *et al.*, 2002a; 2002b). Las características más destacadas son las siguientes (Cremers y Radziemski, 2013):

Análisis sin preparación previa: la muestra puede analizarse directamente sin tratamientos previos ni uso de reactivos químicos, lo que optimiza el tiempo y facilita su aplicación en diversos entornos y muy especialmente en el campo forense en escenarios reales.

Técnica mínimamente destructiva: la cantidad de material requerida para el análisis es extremadamente pequeña, lo que permite conservar la mayor parte de los elementos que componen la muestra. En el caso de las partículas de residuos de disparo (GSR), se ha demostrado que pueden ser clasificadas como tales, mediante microscopía electrónica de barrido (SEM-EDX), después de ser analizadas por LIBS. Se observó una leve variación en su morfología que no impide su identificación (Doña-Fernández *et al.*, 2018). Puede verse un ejemplo en la Figura N° 1, donde se presenta una imagen obtenida mediante SEM-EDX, en la que se aprecia la zona de análisis o incidencia del láser en una muestra de tejido de algodón con posibles residuos de disparo (A) y se muestra la imagen de una partícula de GSR con su composición definida y configuración esférica dentro de esta zona de análisis o spot (B).

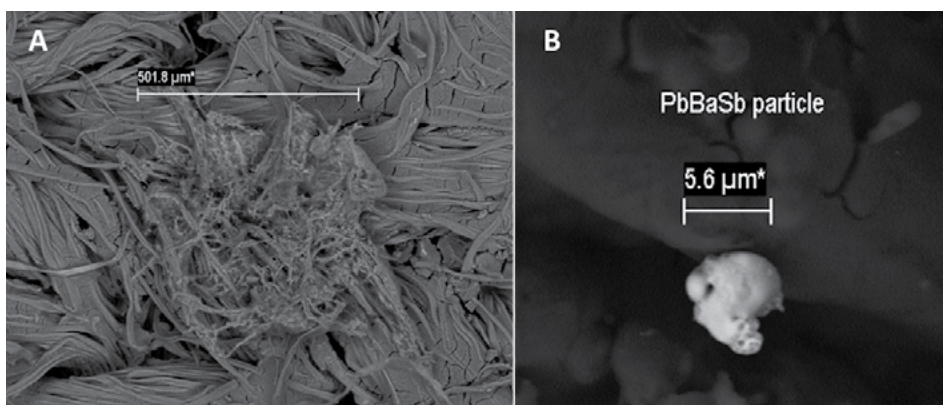


Figura N° 1. Imagen obtenida por SEM-EDX donde se muestra la zona del impacto del láser (spot) (A). Imagen de una partícula de residuo de disparo (GSR) después de haber sido analizada por LIBS (derecha).

Capacidad de análisis cualitativo y cuantitativo: la presencia de las longitudes de onda específicas de cada elemento en el espectro obtenido del análisis permite la identificación (análisis cualitativo), siendo la intensidad de las emisiones proporcional a la concentración (análisis cuantitativo). En el campo balístico esto es de gran importancia, puesto que la información aportada no solo sitúa el elemento, sino determina la cantidad del mismo en las superficies objeto de estudio, lo que posibilita al investigador valorar el conjunto total de la información de forma rápida, permitiendo sacar conclusiones y tomar decisiones del escenario en su conjunto y del tipo de muestras que realmente se corresponden o tienen interés con el hecho estudiado.

Alta sensibilidad: dependiendo de la configuración experimental y la matriz de la muestra, los límites de detección pueden situarse en el rango de partes por millón (ppm) y partes por billón (ppb) (Hahn y Omenetto, 2012).

Alta especificidad: cada espectro obtenido es único y característico de la muestra, lo que permite una identificación precisa de los materiales analizados.

Capacidad de análisis *in situ* y en tiempo real: LIBS puede emplearse en laboratorios, pero también, y no menos importante, en aplicaciones de campo, gracias a la disponibilidad de equipos portátiles ergonómicamente adaptados para los especialistas de la escena. Como se citó anteriormente, su alta sensibilidad evita que los investigadores puedan dejarse muestras en el lugar del hecho (Senesi *et al.* 2020).

Automatización y monitoreo remoto: se puede integrar en sistemas robotizados y otros impulsados por inteligencia artificial para la identificación rápida de los elementos de las diferentes superficies objeto de estudio.

La técnica LIBS, no solo permite evaluar muestras en estado sólido, también puede hacerlo cuando estas se encuentran en estado líquido o gaseoso (Haisch *et al.* 1996), sin el requisito de preparación previa de la muestra, lo que resulta fundamental en escenarios que impiden la demora de las actuaciones.

Todas estas características han hecho que LIBS haya sido implantada en los vehículos enviados por la NASA y otras agencias de exploración espacial en Marte, a bordo de Perseverance, siendo una de las herramientas analíticas químicas incluida en la SuperCam (Rapin *et al.*, 2017; Manelski, *et al.*, 2024). Este hecho demuestra el alto impacto y la importancia que esta tecnología tiene a nivel científico.

Diferentes autores han publicado, a lo largo de las últimas décadas, los avances que se han ido produciendo en la aplicación de esta tecnología en el campo de la balística forense (Rosenberg y Dockery, 2008; Silva *et al.*, 2009; Doña-Fernández *et al.*, 2018; Rodríguez Pascual *et al.*, 2023a; 2023b; 2025; Dockery y Goode, 2003) ya fuera como herramienta única o bien asociada a otras tecnologías Vander Py *et al.*, 2021; Tarifa y Almirall, 2015; Trejos, *et al.*, 2018). Además, uno de los principales logros de esta técnica en esta área ha sido su empleo en la determinación de la distancia de disparo, tanto en munición convencional como en munición libre de plomo. Mediante la comparación con patrones internos de los diferentes elementos constituyentes de los residuos de disparo como son el plomo, cobre, boro, zinc o aluminio, permite determinar de forma automática, la distancia a la cual se ha realizado un disparo, dotándola así de un mayor grado de objetividad (López-López *et al.*, 2017, Vander Pyl *et al.*, 2019; Doña-Fernández *et al.*, 2023).

2. Material y método

Para el análisis y estudio técnico de las evidencias remitidas se hizo uso del material que se indica a continuación:

- Instrumental de medición.
- Cámara fotográfica digital LUMIX. Objetivo Leica 25-600.
- Microscopio WILD MS-C (Heerbrugg).
- Sistema iForenLIBS (Indra).

Con los medios mencionados, se llevaron a cabo los estudios y pruebas detallados a continuación, de acuerdo con los protocolos establecidos para cada uno de los casos descritos:

Caso 1:

1. Determinar orificio/s compatibles con disparo/s de arma de fuego en prenda de vestir.
2. Establecer su número, localización, características.
3. Establecer existencia de residuos y distancia de disparo con el equipo iForenLIBS.

Caso 2:

1. Determinar la existencia de lesiones en el escudo: número, caracteres generales, etc.
2. Estudio de la hoja del cuchillo y establecer compatibilidad con las lesiones del escudo.
3. Análisis de lesiones del escudo y de la hoja de cuchillo con el equipo iForenLIBS.

Equipo de análisis: sistema iForenLIBS

Para el estudio de los residuos de disparo y el análisis de elementos transferidos a una superficie que interactuó con otro objeto, se utilizó el sistema LIBS portátil denominado iForenLIBS. El equipo está diseñado para realizar análisis tanto en campo como en laboratorio. El diseño compacto y ergonómico del sistema, así como sus especificaciones técnicas (irradiancia: $>6\text{GW}/\text{cm}^2$, rango espectral 225-960 nm), permiten un cribado y selección segura de las muestras, posibilitando el análisis tanto directo como indirecto (kit de residuos de disparos, torundas, etc.) en la escena de un delito.

Esta herramienta forense –patentada por Indra Sistemas, empresa líder en el sector tecnológico a nivel mundial en el campo de la defensa y la seguridad y en cuyo desarrollo y adaptación operativa participó activamente, desde el mismo momento de su concepción, la Comisaría General de Policía Científica de la Policía Nacional de España– ofrece grandes ventajas en la criminalística de campo y laboratorio aportando inmediatez y precisión a los estudios forenses. Tanto las especificaciones técnicas como de diseño/funcionalidad operativa fueron descritas y orientadas por los propios agentes policiales que más tarde deberían portarla.

En ocasiones, las Inspecciones Oculares Balísticas pueden prolongarse durante horas e incluso días debido al gran número de elementos que pueden encontrarse en estas escenas. Por ello, el equipo está diseñado para que los operarios puedan llevarlo a la espalda y soportar fácilmente su peso (13 kg y un cabezal de aproximadamente 3 kg) (Figura N° 2). Además, cuenta con una autonomía superior a cuatro horas y una batería intercambiable, lo que lo convierte en una herramienta idónea para análisis prolongados en lugares de difícil acceso o sin suministro eléctrico, dotando de una versatilidad de trabajo muy importante.

iForenLIBS cuenta con una interfaz y un *software* intuitivo que posibilita su manejo tanto a personal experto (titulado) como por aquellos que, sin tener una formación específica en espectroscopía láser, puedan utilizarlo. La visualización de los resultados se realiza a través de una tableta y/o un dispositivo móvil conectado al equipo, lo que permite acceder de inmediato a los datos obtenidos de cualquier tipo de análisis.

El sistema tiene diferentes módulos operativos: Módulo Balístico, Módulo de Tóxicos y Módulo de Laboratorio. Cada uno de ellos tiene condiciones de análisis preconfiguradas, facilitando así su uso. El Módulo de Laboratorio permite, además, modificar los parámetros específicos de adquisición para poder adecuarlo a cualquier tipo de evidencia forense que se desee analizar, en este caso, por especialistas en la materia.



Figura N° 2. Imagen el equipo durante el proceso de análisis en campo.

En el laboratorio, el sistema se incorpora a una plataforma automatizada de análisis (Figura N° 3), que permite el mapeo preciso de las zonas objeto de estudio pudiendo programar el área que se desea analizar.

En el caso de las distancias desde las que se realizó un disparo (Módulo Balístico - Determinación Automática de Distancia de Disparo), una vez finalizado el escaneo de la zona, y mediante el uso de una herramienta quimiométrica avanzada, el sistema estima la distancia por comparación con patrones internos o por comparación con patrones analizados previamente que pueden seleccionarse desde su base de datos.

Los rangos de distancia que ofrece el equipo, fijados por la Sección de Balística de la Comisaría General de Policía Científica, son los siguientes:

- Corta distancia: 8, 15 y 25 cm.
- Media distancia: 25, 50 y 75 cm.
- Larga distancia: 100, 140 y 200 cm.

Además del resultado porcentual de similitud con las distancias establecidas, el sistema genera un mapa de densidad 3D de los elementos característicos de residuos de disparo en superficie (plomo, cobre, zinc, boro, aluminio) (Doña-Fernández *et al.*, 2023). Mediante la observación de la distribución de las partículas encontradas y su concentración, es posible incluso realizar una aproximación a la angulación desde el lugar donde se produjo el disparo hasta la superficie de incidencia o detectar cualquier anomalía.

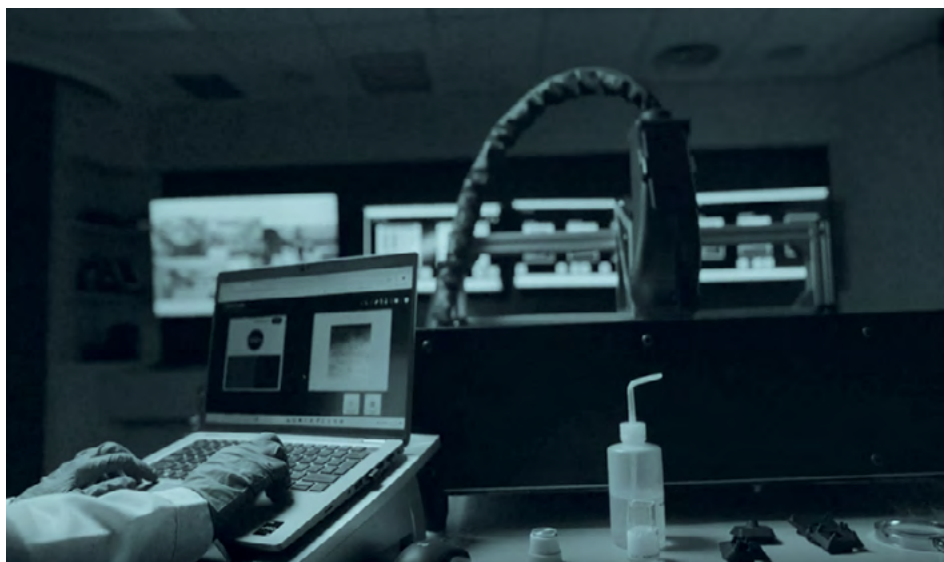


Figura N° 3. Imagen del equipo acoplado a la plataforma motorizada para el escaneo de superficies de forma automatizada.

El estudio de la concentración de los residuos de disparo y de los elementos encontrados en los orificios (plomo, cobre, zinc, antimonio...) producidos por las balas posibilita determinar, cuáles de ellos se corresponden con entradas y cuales son de salidas, incluso en algunos casos, determinar el tipo de blindaje del proyectil (Rodríguez *et al.*, 2025).

Además de lo anterior, esta herramienta genera, en tiempo real, ficheros (.txt) con toda la información analítica obtenida en una muestra desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo, pudiéndose incorporar todo lo anterior en los informes que deban elaborar los especialistas y que servirán de base en los procesos judiciales (Figura N° 4). Con capacidad de análisis automático de 50 elementos, además debido a su amplio rango espectral, es posible detectar/evaluar prácticamente todos los elementos de la tabla periódica. Esto ofrece la posibilidad de valorar *in situ*, tanto en la escena del crimen como en laboratorio, una gran cantidad de parámetros, que resultan fundamentales para realizar un screening certero y evitar la toma de muestras irrelevantes o, en otros casos, toma masiva de muestras que, sin ninguna duda, pueden llegar a saturar los laboratorios policiales y a multiplicar los costes materiales y humanos.

Análisis_42081_Torcedo con residuo.txt Bloc de notas
 Archivo Edición Formato Ver Ayuda

Detected Elements

```

1 H, Li, C, N, O, Na, Al, Si, Ca, Ti, Ni, Cu, Zn, Sr, Sb, Ba, Pb,
2 H, Li, C, Na, Mg, Co, Ti, Cu, Sr, Sb, Ba,
3 H, Li, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Ni, Cu, Sr, Pd, Sb, Ba, Pb,
4 H, Li, C, O, Na, Al, Si, Ca, Ti, Ni, Cu, Zn, Sr, Pd, Sb, Ba,
5 H, Li, C, Na, Mg, Si, Ca, Ti, Sr, Ba,
6 H, Li, C, N, O, Na, Mg, Co, Ti, Cu, Sr, Ba,
7 Li, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, Ca, Ti, Cu, Sr, Pd, Sb, Ba, Pb,
8 H, Li, C, Na, Mg, K, Ca, Ti, Sr, Ba,
9 H, Li, C, Na, Mg, Si, Ca, Ti, Sr, Ba,
10 H, Li, C, N, O, Na, Al, Si, Ca, Ti, Ni, Cu, Sr, Pd, Sb, Ba, Pb,
  
```

Elements Intensity

Nº	H	Li	B	C	N	O	F	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
1	9148	2088	0	2332	1897	3399	0	49557	0	7972	538	0	0	0	0	61971	678	0	0	0	0	997	4164
2	1839	773	0	496	0	0	0	27515	270	0	0	0	0	0	0	27598	2443	0	0	0	0	0	510
3	8235	1614	0	1897	1862	2392	0	49077	1487	7245	284	0	0	0	0	62644	3567	0	0	0	0	665	2831
4	3580	1430	0	1032	0	266	0	42346	0	4591	337	0	0	0	0	61694	4190	0	0	0	0	549	1559
5	2178	494	0	788	171	0	0	21697	0	0	215	0	0	0	0	20122	7338	0	0	0	0	0	0
6	3240	566	0	804	295	489	0	23796	582	0	0	0	0	0	0	45610	3859	0	0	0	0	0	442
7	0	1439	0	736	262	390	0	35597	605	5875	309	0	0	0	0	45803	1055	0	0	0	0	0	675
8	424	379	0	424	0	0	0	22303	394	0	0	0	0	0	4218	14096	3750	0	0	0	0	0	0
9	470	852	0	463	0	0	0	24011	482	0	264	0	0	0	0	23508	4339	0	0	0	0	0	0
10	3022	3138	0	1100	361	392	0	49064	0	15195	360	0	0	0	0	61617	4921	0	0	0	0	716	1035

Figura N° 4. Presentación de los datos en formato .txt, donde se puede ver la totalidad de los elementos detectados y la concentración relativa de ellos.

En la actualidad, la Sección de Balística de la Comisaría General de la Policía Científica (CGPC) de la Policía Nacional de España es el órgano encargado de elaborar, entre otros estudios relacionados con la balística forense, los informes sobre la determinación de distancias de disparo mediante la herramienta iForenLIBS. Desde su adquisición e incorporación en 2019 al elenco de tecnologías de este departamento, se han realizado más de 200 informes a solicitud de jueces y tribunales, logrando notables éxitos en casos de gran relevancia mediática y social.

Los estudios, informes, artículos publicados y valoraciones científicas realizados con esta herramienta (Rodríguez-Pascual *et al.*, 2023a; 2023b; 2025; Doña-Fernández *et al.*, 2016; 2018; 2023; 2019; Rodríguez-Pascual *et al.*, 2023b), entre otros, por el laboratorio químico de la mencionada Comisaría General, acreditado por organismos nacionales e internacionales y respaldado por estándares de calidad reconocidos, validan su capacidad de análisis. Asimismo, la técnica ha sido sometida a distintos test y pruebas interlaboratorios (ENFSI, CTS, RLFOE). Los resultados obtenidos por el equipo otorgan un marchamo de calidad indiscutible a la técnica y al procedimiento de investigación, consolidando a la CGPC como un referente en innovación y desarrollo en el campo de la balística forense.

Protocolo de análisis

Los análisis de los casos presentados se llevan a cabo en el laboratorio de la Sección de Balística Operativa de la Comisaría General de Policía Científica, utilizando para ello el sistema iForenLIBS acoplado a la plataforma motorizada.

Caso 1:

La evidencia es colocada sobre la bandeja portamuestras. El análisis se realiza directamente, sin necesidad de realizar ningún tipo de preparación previa. El cabezal del sistema no tiene contacto directo con la superficie de la evidencia, evitando así cualquier posible contaminación cruzada. Cada lesión es analizada de forma independiente. Se utiliza el Módulo de Balística de Detección de Residuos de Disparo (MB-DRD) y de Determinación de Distancia de Disparo (MB-DDD). En la versión del equipo con la que se valora el presente caso, el tiempo medio de estudio ascendió a aproximadamente 2 horas y 30 minutos por orificio, con una cantidad total de 2.917 análisis. No obstante, con la implementación de la versión V2, adquirida recientemente en la Comisaría General de Policía Científica, el tiempo de procesado se reducirá significativamente, situándose en torno a los 55 minutos por muestra.

Caso 2:

En primer lugar, se procede al análisis tanto en profundidad como en superficie de la primera evidencia (arma blanca).

A continuación, se evalúa la segunda evidencia (escudo). Debido a la naturaleza de la muestra y del tipo de análisis que se desea realizar, en este caso, se procede a una toma de muestra o extracción previa de los posibles residuos o elementos que se encuentran en la superficie mediante un adhesivo transparente del tamaño de la lesión que se desea evaluar. Cada adhesivo se coloca en la plataforma y se programa un escaneo de toda el área.

En este proceso, se utiliza el Módulo de Laboratorio (ML) para evaluar los diferentes elementos que pueden ser encontrados en ambas evidencias.

3. Aplicación en casos reales: Resultados

Como advertencia previa a los lectores, es importante señalar que algunos de los datos relacionados con los asuntos tratados en este artículo, investigados por el Departamento de Balística Forense de la CGPC, serán omitidos por motivos de seguridad, confidencialidad, imagen, secreto de las actuaciones, etc. No obstante, se ofrecerá una visión general de dichos asuntos, en la que se mostrarán las pautas operativas reales para su resolución, así como los protocolos de actuación previstos para cada caso.

Caso 1: víctima con dos orificios en camisa

La unidad policial que inicia las diligencias de investigación por la muerte de una persona, con dos lesiones situadas en el hemitórax izquierdo y derecho, respectivamente, solicita a la Sección de Balística Forense de la CGPC que se emita un informe para determinar el tipo de lesiones existentes en la camisa de

la víctima y, en caso de que alguna de ellas se correspondiera con un disparo, se estableciera la distancia a la que se realizó.

Una vez efectuadas las actuaciones previas, y tras el examen macroscópico de la prenda, se observa que las dos lesiones existentes en la camisa muestran características diferentes. Una de ellas tenía forma alargada y vertical, con los bordes levemente deshilachados, mientras que la otra presentaba un aspecto más ovoide y con bordes más limpios.

Se realizó un análisis de ambas lesiones con el equipo iForenLIBS. En la primera lesión (alargada) no se detectan residuos de disparo. En el caso de la segunda, la detección fue positiva en residuos de disparo (partículas GSR).

Se procede a realizar un escaneo para determinar si se trata de un orificio de entrada y, en caso afirmativo, estimar la distancia de disparo. Se utiliza el Módulo Balístico: Determinación de Distancia de Disparo (MB-DDD), el cual integra de forma automatizada todos los parámetros necesarios para el cálculo. Al comenzar el análisis, el sistema genera un identificador (ID), creando un registro de todos los datos generados durante el mismo en la BBDD que garantiza la integridad de la información y la trazabilidad completa, conforme a los requisitos de la cadena de custodia. El escaneo del área se basa en un barrido de la zona del orificio, y posteriormente continúa formando ocho ejes de 8 cm cada uno a su alrededor, lo que da como resultado un total de 2917 análisis en forma de estrella.

Una vez concluidos los análisis de la lesión de morfología ovalada, se observa una elevada concentración de residuos de disparo en la zona del orificio en el mapa de densidad obtenido, indicativo de que se trataba de un orificio de entrada producido por el impacto de un proyectil disparado (anillo de limpieza). El resultado de distancia de disparo estimado por el sistema es de 50 cm (Figura N° 5).



Figura N° 5. Imagen generada por iForenLIBS con un mapa de densidad respecto al plomo en 3D, donde se observa la distancia y la angulación.

En base a los datos obtenidos (mapa de densidad y estimación de la distancia), se observó que la mayor distribución/concentración de residuos de disparo, tomando como marcador específico el plomo (Pb), se localizaba en la región superolateral izquierda de la lesión identificada en el tejido. Para que este tipo de análisis tenga validez interpretativa, resulta fundamental colocar la prenda de vestir en una posición lo más próxima posible a la que presumiblemente ocupaba durante el momento del impacto, es decir, simulando su disposición anatómica normal sobre la víctima. Esta metodología permite a los investigadores realizar inferencias fundamentadas en cuanto a la posición relativa entre el tirador y la víctima.

La imagen tridimensional obtenida sugeriría que el disparo podría haberse efectuado con una angulación aproximada de 60°, presentando una trayectoria claramente descendente. Esta estimación está basada en ensayos y estudios previos de patrones donde han sido evaluados diferentes ángulos.

En este caso concreto, si se parte de la hipótesis de que la víctima se encontraba en posición erguida en el momento del disparo, como sugería la inspección realizada en el escenario criminal, la disposición espacial de los residuos permite concluir que el arma se hallaba en un plano superior al del torso de la víctima, lo cual resulta incompatible con la versión ofrecida por el sospechoso, quien declaró haber actuado en solitario y durante un forcejeo cuerpo a cuerpo. Esta discrepancia quedó reflejada en el informe pericial correspondiente, desacreditando así la veracidad de su testimonio.

Caso 2: lesiones en escudo policial

Atendiendo a una llamada de auxilio, dos patrullas policiales se dirigieron a un domicilio donde un individuo, armado con un cuchillo de grandes dimensiones, amenazaba a vecinos y familiares. Los agentes, protegidos con un escudo policial, intentaron reducir al atacante, quien arremetió contra ellos en múltiples ocasiones con la clara intención de acabar con sus vidas, dirigiendo los golpes hacia zonas vitales. Ante esta amenaza inminente, los policías hicieron uso de su arma reglamentaria, abatiendo al agresor.

Las autoridades judiciales solicitaron un estudio pericial para determinar si el cuchillo hallado en la escena impactó contra el escudo policial (Figura N°6) y, de ser así, en qué puntos, con el fin de esclarecer la existencia de *animus necandi* en la acción del atacante.



Figura N° 6. Imagen del escudo policial donde se aprecian marcas que, posiblemente, podían haberse realizado durante la agresión en el momento del ataque con el cuchillo.

La Sección de Balística, tras examinar el escudo y las múltiples lesiones que presentaba (algunas de ellas antiguas), tomó una muestra blanco de la evidencia mediante el equipo iForenLIBS. Posteriormente, se analizó su composición elemental y, mediante trasplante por adhesivo, se efectuó una extracción en una de las lesiones más significativas (Figura N° 7). Del mismo modo, se llevó a cabo un análisis del cuchillo implicado en los hechos.

Para la realización de los estudios comparativos de los elementos químicos característicos del escudo y los existentes en la hoja del cuchillo, se utilizó el módulo de Laboratorio indicado. En este caso, es necesario determinar previamente las condiciones de análisis para la adquisición de los datos, siendo necesario experiencia previa de la tecnología.

El escudo policial analizado está fabricado en un polímero de alta resistencia, probablemente policarbonato o PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol), materiales orgánicos caracterizados por su elevada resistencia al impacto. Aunque la tecnología LIBS permite el análisis de compuestos orgánicos, el enfoque del análisis pericial se centra en la identificación de los elementos inorgánicos presentes en aditivos, estabilizantes o pigmentos, tanto en el polímero base como en las inscripciones (“POLICÍA”). La evaluación de estos elementos es crucial, ya que podrían resultar interferentes o comunes con la composición del cuchillo. Su identificación ayuda a determinar qué elementos son específicos de cada objeto.

Entre los elementos detectados en el escudo destacan: titanio (Ti), silicio (Si), bario (Ba), plomo (Pb) y cloro (Cl). La metodología de estudio consiste en

establecer un cotejo químico entre la zona de la lesión y las posibles superficies de contacto, identificando de forma cuantitativa y cualitativa aquellos elementos cuya presencia diferencial permite atribuir la transferencia de material entre ambas superficies. En aquellos casos en que alguno de los elementos estuviera presente en ambas evidencias, se aplicaría el criterio de detección cuantitativa positiva determinado en los estudios previos de validación realizados por la Comisaría General de Policía Científica (Rodríguez-Pascual *et al.* 2023a) en la cual se establece que: “una detección se considera positiva cuando el valor de la concentración relativa medida en unidades arbitrarias (u.a) del elemento evaluado es mayor que dos veces el valor inicial en la muestra (análisis de control)”. La concentración de cada elemento es proporcional a la altura de la línea emisión (pico) observada en el espectro. Se define como concentración relativa al valor de la intensidad del elemento menos la media del background. El valor de la concentración es calculado directamente por el sistema y se muestran en el fichero txt que se genera en cada análisis.

En el caso del cuchillo los elementos considerados como característicos de su composición base fueron: molibdeno (Mo), hierro (Fe), cromo (Cr) y estroncio (Sr).

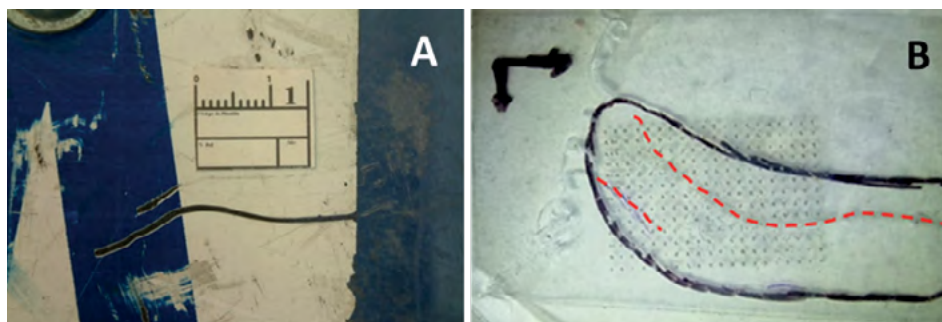


Figura N° 7. Fotografía de zona del escudo con lesiones compatibles con la agresión de arma blanca (A). Imagen del adhesivo utilizado para la extracción de los residuos después de haber sido analizado por iForenLIBS (B).

Una vez analizado el adhesivo, se representaron los principales elementos químicos encontrados: molibdeno (Mo), hierro (Fe) (Figura N° 8), cromo (Cr) y estroncio (Sr) (Figura N°9), obteniéndose las imágenes de concentración en superficie que se muestran a continuación.

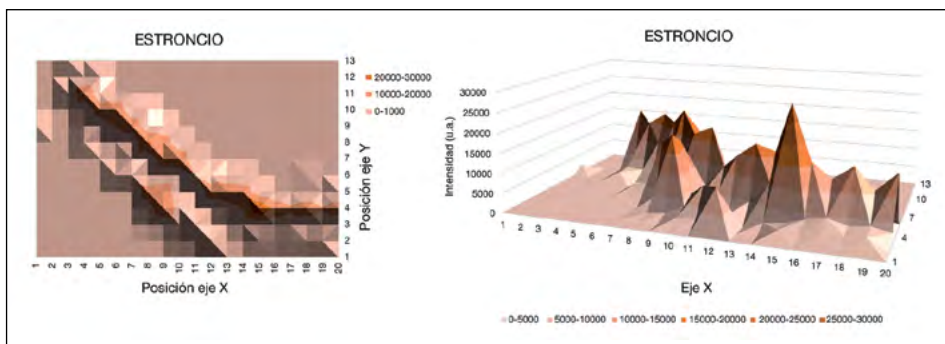
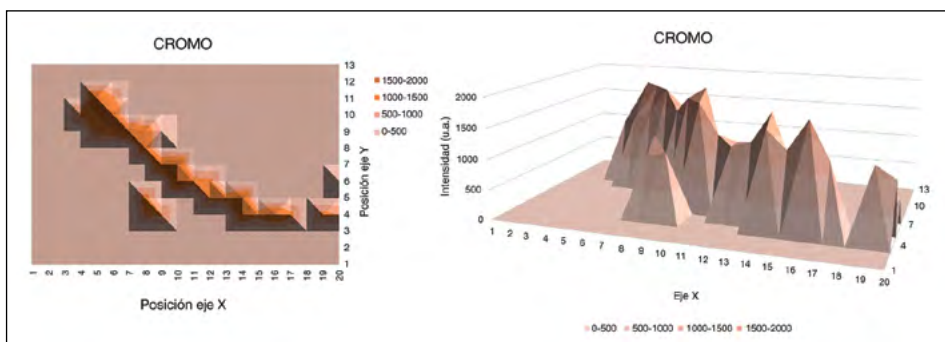


Figura N° 8. Gráficas 3D obtenidas mediante iForenLIBS de los distintos elementos químicos resultantes del análisis de las lesiones estudiadas y coincidentes con los hallados en el cuchillo: molibdeno (Mo) y de hierro (Fe).

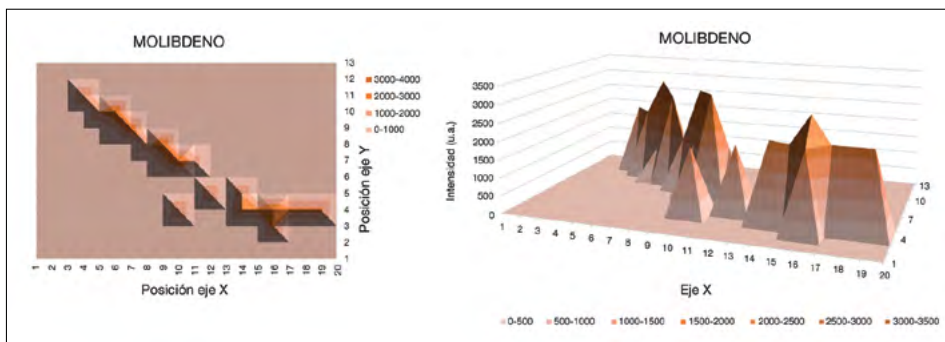
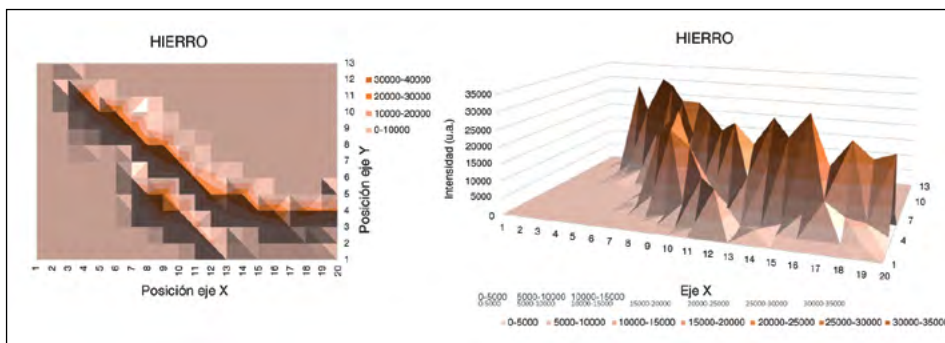


Figura N° 9. Gráficas 3D obtenidas mediante iForenLIBS de los distintos elementos químicos resultantes del análisis de las lesiones estudiadas y coincidentes con los hallados en el cuchillo: estroncio (Sr) y cromo (Cr).

Como resultado de los estudios realizados, se obtuvieron conclusiones que evidenciaron que la lesión analizada contenía elementos químicos característicos del material constitutivo de la hoja del cuchillo, los cuales no se encontraban presentes en la composición original del escudo, entre ellos: molibdeno (Mo), hierro (Fe), cromo (Cr) y estroncio (Sr). Este hallazgo constituyó una evidencia fundamental de la existencia de un contacto directo entre el cuchillo y la zona del escudo lesionada.

4. Conclusiones

A partir de la información y los resultados obtenidos en el conjunto de estos casos, se establecen las siguientes conclusiones:

1ª. La espectroscopía de ruptura inducida por láser (LIBS) se ha consolidado como una herramienta de análisis químico de gran precisión en el ámbito forense, destacando especialmente en balística con la capacidad para identificar la composición elemental de las partículas de residuos de disparo (GSR) y de los restos de residuos de disparo sin preparación previa y con un impacto mínimo en la integridad de la muestra. La alta sensibilidad y especificidad de esta técnica para el análisis elemental de las muestras favorecen una identificación fiable de los materiales analizados, proporcionando resultados objetivos que refuerzan la solidez científica de las investigaciones.

2ª. El sistema iForenLIBS representa un avance significativo en el análisis forense, combina portabilidad, precisión y versatilidad en un solo equipo. Destaca su capacidad de operar tanto en laboratorio como en campo, con un diseño ergonómico y resistente, lo que garantiza un análisis eficaz en cualquier escenario, incluso en condiciones adversas, asegurando que ninguna muestra relevante quede sin examinar. Permite a los investigadores realizar cribados precisos y evitar la acumulación de muestras irrelevantes, reduciendo costos y optimizando los recursos en los laboratorios forenses. La flexibilidad en su manejo optimiza el tiempo y la eficacia de los peritos en el análisis balístico forense en la escena del delito.

3ª. La implementación de LIBS en el estudio de residuos de disparo y superficies impactadas ha supuesto un avance significativo en la determinación de la distancia de disparo, además del tipo de munición empleada. Su capacidad para realizar análisis tanto cualitativos como cuantitativos ha permitido a los investigadores obtener información clave con rapidez, optimizando la toma de decisiones en el desarrollo de peritajes balísticos.

4ª. El sistema iForenLIBS ha sido determinante en las resoluciones judiciales, tanto en los casos referenciados en este artículo como en los otros muchos de los más de 200 casos estudiados desde la implantación de esta tecnología en la Comisaría General de Policía Científica.

5. Bibliografía

ASTM International (2020). *ASTM E1588-20: Standard practice for gunshot residue analysis by scanning electron microscopy/energy dispersive X-ray spectrometry*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/E1588-20>

Bridge, C. M.; Powell, J.; Steele, K. L. y Sigman, M. E. (2007). Forensic comparative glass analysis by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 62(12), 1419–1425. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2007.10.015>

Brunnbauer, L.; Gajarska, Z.; Lohninger, H. y Limbeck, A. (2023). A critical review of recent trends in sample classification using laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Trends in Analytical Chemistry*, 159, 116859. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2022.116859>

Castillejo, M.; Martín, M.; Silva, D.; Stratoudaki, T.; Anglos, D.; Burgio, L. y Clark, R. J. H. (2000). Laser-induced breakdown spectroscopy and Raman microscopy for analysis of pigments in polychromes. *Journal of Cultural Heritage*, 1(1), 297–302. [https://doi.org/10.1016/S1296-2074\(00\)00171-0](https://doi.org/10.1016/S1296-2074(00)00171-0)

Chisum, W. J. y Turvey, B. E. (2011). *Crime Reconstruction* (2ª ed.). Elsevier Inc.

Cremers, D. A. y Radziemski, L. J. (2013). *Handbook of Laser-Induced Breakdown Spectroscopy* (2ª ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118567371>

Dockery, C. R. y Goode, S. R. (2003). Laser-induced breakdown spectroscopy for the detection of gunshot residues on the hands of a shooter. *Applied Optics*, 42(30), 6153–6158. <https://doi.org/10.1364/AO.42.006153>

Doña-Fernández, A.; De Andrés, I.; Sanchez, F. A., Valtuille, E.; Heras, A. y Busta, A. (2016). iFORENLIBS: Application of LIBS to forensic ballistics. GSR detection on sampling kits. En *23rd Annual Meeting of ENFSI Firearms & GSR Working Group*, Roma.

Doña-Fernández, A.; de Andres-Gimeno, I.; Santiago-Toribio, P.; Valtuille-Fernández, E.; Aller-Sanchez, F. y Heras-González, A. (2018). Real-time detection of GSR particles from crime scene: A comparative study of SEM/EDX and portable LIBS system. *Forensic Science International*, 292, 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.09.021>

Doña-Fernández, A.; Rodríguez-Pascual, J.A.; Andres-Gimeno, I.; Gutiérrez-Redomero, E., Valtuille-Fernández, E. y Gomez-Laina, F.J. (2023). Assessing the shooting distance of lead-free ammunition regardless of composition using Laser Induced Breakdown Spectroscopy. *Forensic Sciences Research*, 8(3), 256-264. <https://doi.org/10.1093/fsr/owad022>

Esposito, M.; Sessa, F.; Cocimano, G.; Zuccarello, P.; Rocuzzo, S. y Salerno, M. (2023). Advances in technologies in crime scene investigation. *Diagnostics*, 13(20), 3169. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13203169>

Goode, S. R.; Dockery, C. R.; Bachmeyer, M. F. y Nieuwland, A. A. (2002a). Detecting gunshot residue by laser induced breakdown spectroscopy. *Laser Induced Plasma Spectroscopy and Applications*, 81, 175–177. <https://doi.org/10.1364/LIBS.2002.FB2>

Goode, S.; Thomas, A.; Nieuwland, A. y Morgan, S. (2002b). Characterization and identification of ammunition by laser induced breakdown spectroscopy. En *Laser Induced Plasma Spectroscopy and Applications* (Vol. 81). <https://doi.org/10.1364/LIBS.2002.ThE20>

Hahn, D. y Omenetto, N. (2012). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Appl Spectrosc*, 66 (4), 347-419. <https://doi.org/10.1366/11-06574>

Haisch, C.; Niessner, R.; Matveev, O.I.; Panne, U. y Omenetto, N. (1996). Element-specific determination of chlorine in gases by Laser-Induced-Breakdown-Spectroscopy (LIBS). *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 356, 21-26. <https://doi.org/10.1007/s0021663560021>

- López-López, M.; Alvarez-Llamas, C.; Pisonero, J.; García-Ruiz, C. y Bordel, N. (2017). An exploratory study of the potential of LIBS for visualizing gunshot residue patterns. *Forensic Science International*, 273, 124–131. <http://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.02.012>
- Lucena, P.; Doña, A.; Tobaría, L. y Laserna, J. (2011). New challenges and insights in the detection and spectral identification of organic explosives by laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 66(1), 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2010.11.012>
- Manelski, H.; Wiens, R.; Bousquet, B.; Hansen, P.; Schröder, S.; Clegg, S.; Martin, N.; Nelson, A.; Martinez, R.; Ollila, A. y Cousin, A. (2024). LIBS plasma diagnostics with SuperCam on Mars: Implications for quantification of elemental abundances. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 222, 107061. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2024.107061>
- Rapin, W., Meslin, P.-Y., Maurice, S., Wiens, R. C., Laporte, D., Chauviré, B., Gasnault, O., Schröder, S., Beck, P., Bender, S., Beyssac, O., Cousin, A., Dehouck, E., Drouet, C., Forni, O., Nachon, M., Melikechi, N., Rondeau, B., Mangold, N. y Thomas, N. H. (2017). Quantification of water content by laser induced breakdown spectroscopy on Mars. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 130, 82–100. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2017.02.007>
- Rodríguez-Pascual, J. A.; Doña-Fernández, A.; Loarce-Tejada, Y.; de Andres-Gimeno, I.; Valtuille-Fernández, E.; Gutiérrez-Redomero, E. y Gomez-Laina, F. J. (2023a). Assessment of gunshot residue detection on a large variety of surfaces by portable LIBS system for crime scene application. *Forensic Science International*, 353, 111886. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2023.111886>
- Rodríguez-Pascual, J. A.; Doña-Fernández, A.; Ayra, D. V.; de Andrés-Gimeno, I. y Sogo, P. (2023b). Shooting distance determination in blood-containing samples using LIBS: Real cases. En *29th ENFSI EWG Firearms-GSR Meeting*, Bruselas, Bélgica.
- Rodríguez-Pascual, J. A.; Doña-Fernández, A.; Hernández-Crespo, F. J.; Loarce-Tejada, Y.; Santiago-Toribio, P.; Gutiérrez-Redomero, E. y Gómez-Laina, F. J. (2025). Preliminary study of gunshot residues in entry holes at different angles: Feasibility of using LIBS to support trajectory estimation. *Forensic Science International*, 367, 112349. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0379073824004316>
- Romolo, F. S. y Margot, P. (2001). Identification of gunshot residue: a critical review. *Forensic Science International*, 119(2), 195–211. [https://doi.org/10.1016/S0379-0738\(00\)00428-X](https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00428-X)
- Rosenberg, M. B. y Dockery, C. R. (2008). Determining the lifetime of detectable amounts of gunshot residue on the hands of a shooter using laser-induced breakdown spectroscopy. *Applied Spectroscopy*, 62(11), 1238–1241. <https://doi.org/10.1366/000370208786401473>
- Senesi, G.; Harmon, R. y Hark, R. (2020). Field-portable and handheld LIBS. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (2nd ed.)*, 537-560. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818829-3.00023-X>
- Silva, M. J.; Cortez, J.; Pasquini, C.; Honorato, R. S.; Paim, A. P. S. y Pimentel, M. F. (2009). Gunshot residues: Screening analysis by laser-induced breakdown spectroscopy. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20(10), 1887–1894. <https://doi.org/10.1590/S0103-50532009001000017>
- Singh, J.P.; Almirall, J.R. y Sabsabi, M. (2011). Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). *Anal Bioanal Chem* 400, 3191–3192 <https://doi.org/10.1007/s00216-011-5073-5>
- Tarifa, A. y Almirall, J. R. (2015). Fast detection and characterization of organic and inorganic gunshot residues on the hands of suspects by CMV-GC-MS and LIBS. *Science & Justice*, 55(3), 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2015.02.003>
- Teng, Y.; Zhang, K.; Lv, X.; Miao, Q.; Zang, T.; Yu, A.; Hui, A. y Wu, H. (2024). Gunshots detection, identification, and classification: Applications to forensic science. *Science & Justice*, 64(6), 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2024.09.007>

Trejos, T.; Vander Pyl, C.; Menking-Hoggatt, K.; Alvarado, A. y Arroyo, L. (2018). Fast identification of inorganic and organic gunshot residues by LIBS and electrochemical methods. *Forensic Chemistry*, 8, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.forc.2018.02.006>

Vachon, C. R. y Martínez, M. V. (2019). Understanding Gunshot Residue Evidence and Its Role in Forensic Science. *The American journal of forensic medicine and pathology*, 40(3), 210-219. <http://doi.org/10.1097/PAF.0000000000000483>

Vander Pyl, C.; Ovide, O.; Ho, M.; Yuksel, B. y Trejos, T. (2019). Spectrochemical mapping using laser induced breakdown spectroscopy as a more objective approach to shooting distance determination. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 152, 93–101. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2018.12.010>

Vander Pyl, C.; Martínez-Lopez, C.; Menking Hoggatt, K. y Trejos, T. (2021). Analysis of primer gunshot residue particles by laser-induced breakdown spectroscopy and laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Analyst*, 146(17), 5389–5402. <https://doi.org/10.1039/D1AN00689D>

Zhang, Y.; Zhang, T. y Li, H. (2021). Application of laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) in environmental monitoring. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 181, 106218. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2021.106218>

Cita sugerida: Rodríguez-Pascual, J. A. y Doña-Fernández, A. (2025). Sistema iForenLIBS: Aplicación a casos reales. *Minerva. Saber, arte y técnica*, 9(1). Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina (IUPFA), pp. 6-24.

***RODRÍGUEZ-PASCUAL, JOSÉ ANTONIO**

Instituto Universitario de Investigación en Ciencias Policiales (IUICP), Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, Madrid, España. Sección de Balística de la Comisaría General de Policía Científica (Policía Nacional), Julián González Segador s/n, Madrid, España.

****DOÑA-FERNÁNDEZ, ALICIA**

Doctora Ciencias Químicas- Especialista Análisis Forense. Responsable de Proyecto área de Ingeniería de Sistemas INDRA. Sistema de Defensa y Seguridad (Indra), Aranjuez, Madrid, España.