

VIRTOPSIA Y ESPECTROMETRÍA DE MASA COMO AUXILIAR EN LA MEDICINA FORENSE

Michelle del Carmen Rangel Castro¹

Universidad UMECIT, Panamá

midelcara@hotmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-5269-1536>

DOI: 10.37594/saluta.v1i11.1647

Fecha de recepción: 23/12/2024

Fecha de revisión: 15/01/2025

Fecha de aceptación: 20/01/2025

RESUMEN

La virtopsia y la espectrometría de masas son tecnologías emergentes en el ámbito de la medicina forense que pretenden cambiar la forma en que se llevan a cabo las autopsias y se examinan las pruebas. La virtopsia usa técnicas como la tomografía computarizada (TC) y la resonancia magnética (RM) para hacer representaciones tridimensionales del cuerpo sin necesidad de incisiones. Esto ayuda a estudiar lesiones e identificar traumas. Por otro lado, la espectrometría de masas posibilita la identificación y cuantificación de sustancias a niveles moleculares precisos, lo cual resulta esencial para la identificación de toxinas, fármacos y otros componentes relevantes en casos de investigación forense. La utilización de estas técnicas no solo mejora la información disponible para los médicos forenses, sino que también contribuyen a preservar la dignidad del fallecido y pueden influir en el veredicto judicial al proporcionar pruebas claras y objetivas. El presente artículo examinará estudios de caso y aplicaciones prácticas de estas tecnologías, examinando sus limitaciones y el futuro potencial en el ámbito forense.

Palabras clave: Virtopsia, espectrometría de masas, medicina forense.

VIRTOPSY AND MASS SPECTROMETRY AS AN AUXILIARY IN FORENSIC MEDICINE ABSTRACT

Virtopsy and mass spectrometry are emerging technologies in forensic medicine that aim to change the way autopsies are performed and evidence is examined. Virtopsy uses techniques such as computed tomography (CT) and magnetic resonance imaging (MRI) to make three-dimensional representations of the body without the need for incisions. This helps study injuries and identify trauma.

¹ Doctora en Cirugía Dental, Especialista en Administración de Servicios de Salud y Magíster en Gerencia de los Servicios de Salud. Docente investigadora de la Universidad Metropolitana de Educación, Ciencia y Tecnología.

On the other hand, mass spectrometry makes it possible to identify and quantify substances at precise molecular levels, which is essential for the identification of toxins, drugs and other relevant components in forensic investigation cases. The use of these techniques not only improves the information available to forensic doctors, but also contributes to preserving the dignity of the deceased and can influence the judicial verdict by providing clear and objective evidence. This article will examine case studies and practical applications of these technologies, examining their limitations and future potential in the forensic field.

Keywords: virtopsy, mass spectrometry, forensic medicine.

INTRODUCCIÓN

La medicina forense se enfrenta a una constante dificultad para obtener evidencia precisa y fiable en la investigación de delitos y la determinación de causas de muerte. La virtopsia, técnica que fusiona la imagenología médica con la autopsia virtual, ha tenido lugar como una opción no invasiva a los métodos tradicionales. Con la espectrometría de masas, una herramienta analítica que posibilita la identificación de rápidos compuestos químicos y biológicos, se presenta un enfoque innovador que puede asimilarse con las técnicas forenses habituales. Este artículo analiza cómo la integración de la virtopsia y la espectrometría de masas no solo incrementa la efectividad de las investigaciones forenses, sino también brinda nuevas posibilidades para el análisis post mortem, lo cual posibilita una mayor precisión en la determinación de causas de muerte y el análisis de sustancias tóxicas.

Virtopsia y espectrometría de masas

La virtopsia, conocida también como autopsia virtual, se trata de un procedimiento forense que utiliza técnicas de imagen como la Tomografía Computarizada (TC) y la Resonancia Magnética (RM) con el fin de examinar el interior del cuerpo de un paciente fallecido. La virtopsia, en comparación con las autopsias convencionales, es un método no intrusivo, lo que significa que no requiere cortes ni incisiones en el cuerpo (Euroinnova, 2020).

En la esencia de la virtopsia se encuentra la adopción de sistemas de imagen avanzados. Estos sistemas posibilitan a los médicos forenses obtener imágenes detalladas en 3D del interior del cuerpo, lo cual posibilita la identificación de lesiones internas, patologías o cualquier otro indicio relevante para determinar la causa de la muerte.

La TC es una de las herramientas esenciales en la virtopsia. Mediante rayos X, se pueden generar imágenes detalladas en secciones del cuerpo. En el contexto de la virtopsia, las pruebas de

alta resolución permiten a los investigadores examinar el cuerpo en capas, revelando estructuras internas de un nivel de detalle asombroso.

La Resonancia Magnética (RM) complementa la TC al proporcionar imágenes detalladas de tejidos blandos. Se emplean campos magnéticos y ondas de radio para producir imágenes que son altamente útiles para la evaluación del cerebro, músculos y órganos internos. En la virtopsia, la RM puede detectar patologías que no son fácilmente visibles mediante otros procedimientos, tales como daños en los tejidos blandos o enfermedades cerebrales (García et al, 2019).

Por otro parte, la espectrometría de masas de alta resolución es una técnica reciente en el análisis de laboratorio que permite la identificación de un compuesto con un nivel superior de exactitud y precisión utilizando el espectro de fragmentación del compuesto. La colección de espectros destinados a una serie de compuestos puede ser organizada en una biblioteca de espectros de alta resolución que pueden ser compartidas.

Virtopsia: Técnicas de imagen y su integración

A lo largo de un período de tiempo, y impulsado en parte por la disminución del número de autopsias en medios hospitalarios, se ha evidenciado la adopción de métodos alternativos a la autopsia tradicional, que han sido denominados “*opsias*”.

Se ha implementado el término “*virtopsia*” (Thali, 2003) como término para referirse al conjunto de procedimientos API con el propósito forense, que pueden ser aplicados mediante técnicas radiológicas (radioscopsias). Estas técnicas tienen aplicaciones en la Patología y en la Clínica Forense.

La ventaja se encuentra en la posibilidad de examinar el cuerpo humano o una zona anatómica en tiempo real, sin abrir o mutilar el cuerpo y, además, interactuar de forma eficaz. La virtopsia puede ayudar a detectar detalles ocultos, conocer las propiedades de los tejidos, investigar las formas de lesión en modelos tridimensionales y tener un gran beneficio en la medicina forense.

En la virtopsia, se emplean dos técnicas denominadas análisis y proceso. La ventaja radica en que podemos llevarlo a cabo interactivamente y sin alterar el modelo, lo cual permanecerá siempre a nuestra disposición para proseguir con el análisis interactivo.

Técnicas de proceso: Se trata de operaciones que tienen como propósito modificar alguna de las características de la imagen con diversa finalidad, que pueden extenderse desde la mejora de

su calidad hasta la detección de elementos apenas visibles o la identificación de elementos apenas visibles u ocultos al ojo humano. Estos procesos pueden incluir:

- Magnificación
- Filtrado
- Detección de bordes
- Manipulación de paletas
- Sustracción de fondos y de imágenes
- Reconstrucción (2D, 3D)
- Interacción de píxeles (división, multiplicación, suma, resta, etc.)
- Manipulación matemática de píxeles (mediante operaciones aritméticas o funciones)
- Segmentación
- Otros.

Técnicas de análisis: Se trata de operaciones de índole mensurativa llevadas a cabo sobre una imagen, y con el propósito de obtener información acerca de algunas de las características del objeto u objetos a los que pertenece dicha imagen. Aquí priman los cálculos como elemento principal de lo analizado. No se emplean funciones para manipular la imagen, sino que se persigue obtener datos numéricos del objeto al que pertenece la imagen mediante el análisis de dicha imagen.

De esta forma, podemos medir su tamaño, forma, perímetro, número de objetos determinados, densidad óptica, color, distancia entre objetos o formas, ángulos, trayectorias, etc. Las técnicas podrán, así, incluir la:

- Morfometría
- Densitometría
- Reconstrucciones tridimensionales
- Otros procesos (contaje, colorimetría, etc.)

Algunos han denominado la visualización interactiva de imagen como la posibilidad de examinar los ficheros obtenidos por las técnicas de radiología digital, mediante una interacción en tiempo real con las imágenes obtenidas. Esto es, en realidad, una combinación entre las técnicas de proceso y el análisis de imagen, ya que podemos modificar esta, realizarla, magnificarla, medirla, convertirla en un modelo tridimensional, que, a su vez, puede ser manipulado, etc.

Los usos de esta visualización en el campo forense, tanto en el vivo como en el cadáver, son considerable. En consecuencia, al igual que un patólogo forense requiere conocer las técnicas macro y microscópicas de examen, la virtopsia requiere del proyector virtual que posea una amplia

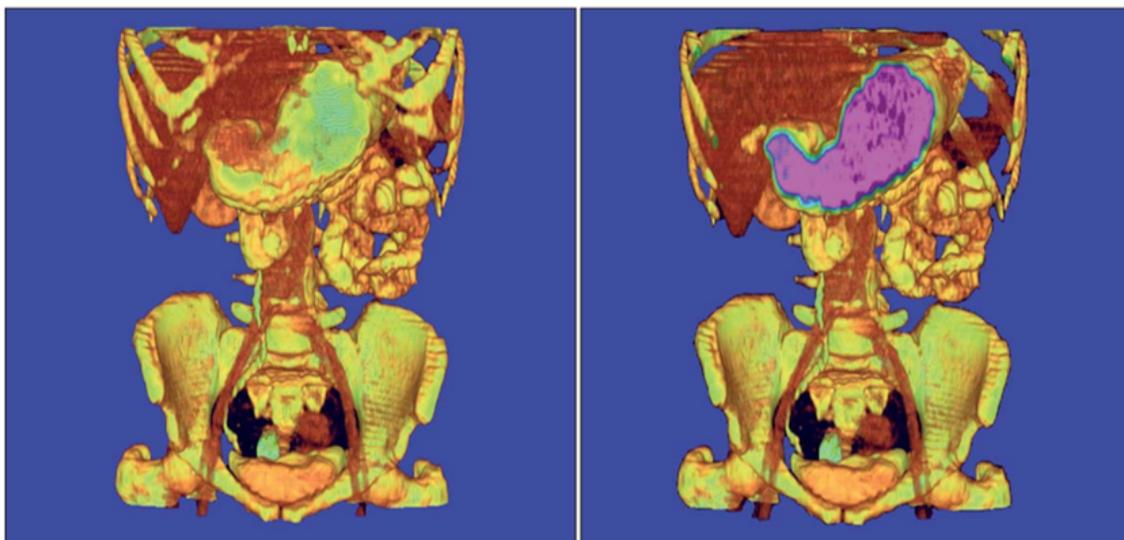
comprensión de los recursos informáticos que posibilitan este tratamiento de la imagen digital.

Técnicas 3D:

Se han aplicado a múltiples campos en Medicina y Biología (Robb,2000). Entre ellas distinguimos principalmente dos tipos:

Reconstrucciones: Las reconstrucciones tridimensionales son unas de las técnicas que producen resultados más espectaculares en el análisis de imagen asociado a la autopsia dentro del análisis de imagen. La utilización de tal elemento como medio para proporcionar información acerca de las lesiones y también como un método reconstructivo del suceso ha sido recientemente evidenciada (Thali, 2005).

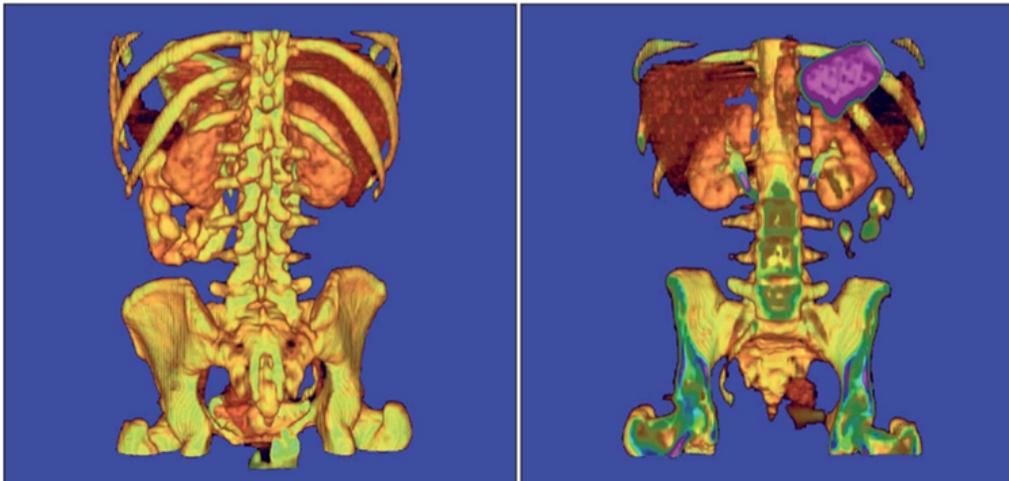
Figura 1.



Figuras 3 y 4: Imágenes de virtopsia toraco-abdominal. En 3 son visibles la mayoría de las vísceras abdominales, así como estructuras retroperitoneales, como el uréter derecho y el intestino delgado. La exploración se realizó en sujeto vivo, con contraste baritado, de ahí que el estómago e intestino delgado aparezcan tan visibles. Igualmente es patente la aorta y la bifurcación ilíaca. En 4 se aprecia la mucosa gástrica al haberse cortado virtualmente el estómago.

A través de este procedimiento podemos elaborar un modelo tridimensional del caso que, a su vez, puede ser sometido a visualización interactiva. Podemos procesarlo virtualmente, con cortes en el sentido que queramos, sustracciones de elementos como partes blandas, hueso, etc. Se pueden calcular volúmenes, trayectorias, ángulos o cualquier otro elemento morfométrico que ayude a reconstruir los hechos y presentar en los casos. Estas técnicas pueden ser empleadas tanto en el cadáver como en el vivo, lo cual excede el campo de actuación de la patología post-mortal, con el fin de entrar de lleno en la evaluación del daño corporal.

Figura 2.



Figuras 5 y 6: Una de las ventajas de la virtopsia es la interacción en tiempo real con el modelo, pudiendo someter a este a extracciones de elementos o a cortes o segmentaciones. En las imágenes se aprecia el esqueleto toraco-pelviano y diferentes órganos como el riñón desde ángulos distintos y perspectivas diferentes.

Los ficheros de imagen también contienen información sobre la estructura molecular y mineral del espécimen, con lo que podrían, en un futuro, a través de la reconstrucción, adquirirse incluso las propiedades físico-químicas del objeto (resistencia, elasticidad, coeficiente de rozamiento, peso, deformabilidad, etc. Es sumamente importante en reconstrucción 3D, ya que, si conocemos, por ejemplo, cuáles son las características físicas de una cabeza, conoceremos, por ejemplo, qué fuerza hay que aplicar para romper el hueso en ese caso, lo cual sería enormemente útil desde el punto de vista médico-legal.

Asimismo, es factible reconstruir en animación tales características, tales como un puñetazo que impactó en el sujeto en el suelo o cualquier otro acontecimiento con una gran fidelidad, y solventar problemas tales como la técnica de producción de lesiones craneales, entre otras.

Dramatizaciones

Se trata de recreaciones animadas más o menos fiables de un suceso a partir de los elementos de investigación científica que puedan adquirirse del suceso. Es imperativo que los datos se aproximen con mayor precisión a elementos cuantificables obtenidos del suceso. Esto quiere decir que tantos más elementos de esa temática poseamos, menos podremos hablar de dramatización y más de reconstrucción. A pesar de ello, la dramatización resulta sumamente útil en el contraste de diversas hipótesis en un caso. En ocasiones, esta simulación puede resultar efectiva para rechazar alguna de ellas, sin que se confirme, lógicamente, ninguna, lo cual siempre es mejor que nada. En ocasiones, los testigos que se les presentan pueden brindar información fiable sobre la pantalla en relación con cuál de ellas es la más cercana a la realidad.

Morfometría: Se trata de llevar a cabo mediciones sobre una imagen en relación a parámetros relacionados con su forma y dimensiones, a fin de extraer los análogos correspondientes al objeto al que pertenece la imagen. Dado que los documentos DICOM contienen información exhaustiva acerca de la calibración, podemos llevar a cabo diversas mediciones acerca de la calibración (ángulos, distancias, perímetros, trayectorias, etc. Estas mediciones resultan de enorme utilidad en el estudio forense de las lesiones.

La morfometría puede efectuarse en el volumen tridimensional del cuerpo mediante sus dimensiones reales, lo cual representa una gran ventaja. Asimismo, es factible interactuar con el modelo para simular aperturas, segmentar regiones de interés, aislar órganos, entre otros aspectos.

Densitometría: Se fundamenta en la existencia de una correspondencia entre la densidad óptica de la imagen (DO) y la intensidad o luminosidad de un píxel en la imagen. En Antropología Forense, el estudio de las densidades óseas puede ser relevante en el diagnóstico de la data de la muerte (Baena,2001).

Aplicaciones de la virtopsia y la espectrometría de masas en investigaciones forenses

La virtopsia ofrece múltiples aplicaciones en el campo de las investigaciones forenses tales como:

- **Patología forense:** El enfoque principal en este ámbito es la investigación sobre las lesiones y las causas de muerte. La identificación de hematomas ocultos y la trayectoria de lesiones puede ser útil para resolver un caso (Yen, 2004). Asimismo, las mediciones morfométricas de las lesiones son exactas y posibilitan una minuciosa documentación del caso, que puede ser examinada en múltiples ocasiones.

La etiología y la causa de las lesiones pueden ser examinadas de una manera sumamente precisa. La fractura craneal o espinal puede ser evaluada con precisión en sus aspectos morfológicos y puede generar un modelo tridimensional real, lo que permite identificar el mecanismo de producción. También en lesiones de huesos largos resulta de extrema utilidad este modelado tridimensional.

- **Tanatología:** Se han publicado trabajos que señalan la utilidad de la espectroscopia RNM en el estudio bioquímico del cadáver. En el futuro, podemos calcular la data de la muerte y otros elementos bioquímicos que pueden ayudar a crear una histoquímica no invasiva. (Baena, 2001).
- **Identificación:** La TC posibilita la visualización del semblante del individuo en un modelo tridimensional, lo cual podría ser aplicado en el futuro para la creación de esculturas

forenses virtuales con efectos identificativos.

- Antropología forense: La morfometría y densitometría tienen evidente interés aquí. Los modelos procedentes de los DICOM obtenidos por TC pueden ser sometidos a mediciones de todos los parámetros antropológicos. La densitometría proporcionada por la TC proporciona información detallada acerca de la mineralización del hueso, lo cual puede ser empleado en cálculos de data de la muerte.
- Valoración del daño corporal: En valoración de daño, las principales aplicaciones son las siguientes:
 - Morfometría de lesiones (trayectorias, dimensiones, ángulos, áreas, volúmenes, etc.).
 - Estudio de causalidad médico-legal.
 - Estudio de los mecanismos de producción de las fracturas.

La espectrometría de masas, por otra parte, en estudios forenses, es una tecnología que brinda una potente herramienta para la investigación forense. Para aquellos investigadores forenses que exploran sus muestras en busca de compuestos desconocidos, metabolitos de drogas, sustancias químicas o beneficios, nuevas sustancias psicoactivas que nunca se habían detectado o caracterizado. La función de la espectroscopia de masas en el ámbito forense puede definirse como un análisis molecular o elemental (Longdom,2024). Las moléculas no iónicas volátiles comparativamente pequeñas que se encuentran en una especie de muestras forenses pueden examinarse con ionización electrónica y química de analizadores de masa de una etapa única que proporcionan datos estructurales y de masa molecular relativa. Las moléculas no polares y polares y sus metabolitos que se encuentran con frecuencia en matrices biológicas junto con analitos alternativos de interés forense pueden determinarse a través del uso de electrospray.

Espectrometría de masas: Identificación de sustancias y trazas

Los laboratorios emplean la espectrometría de masas con el fin de confirmar la presencia de compuestos químicos en muestras clínicas, toxicológicas y ambientales. Los laboratorios también utilizan la espectrometría de masas para examinar la estructura de un compuesto, dividiéndolo en sus componentes y evaluando su masa e intensidad. Esto se llama espectro de masas de fragmentación y los datos se comparten en una biblioteca de espectros de masas. La biblioteca puede proporcionar información de referencia para aumentar la confianza en la identificación de compuestos cuando no se dispone de material de referencia estándar comercial.

La espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente se utiliza igualmente en el análisis de residuos de disparo debido a su elevada sensibilidad, precisión y bajos límites de

detección (Skoog, 2001) y que tiene límites de detección superiores a los de las técnicas ópticas para la mayoría de los elementos de la tabla periódica. En esta situación se produce la oxidación y ionización de los elementos mediante el análisis en un plasma de argón, seguida por la separación de los iones obtenidos por su relación masa/carga, y finalmente, el recuento del número de iones de cada tipo cuando se encuentran en un detector (Thomas, R. 2004) Los espectros producidos de esta manera son sencillos y se utilizan para la determinación cualitativa de los elementos presentes en la muestra; para su medida cuantitativa se tienen curvas de calibración en las que se representa el cociente entre el recuento de iones para el análisis del recuento para un estándar interno en función de la concentración (Taylor, H. 2001).

Los fragmentos de disparo son pruebas físicas, traza, que se derivan de la descarga de un arma de fuego y están compuestos por partículas tanto inorgánicas como orgánicas. El estudio forense se ha enfocado en la fracción inorgánica, en particular en el antimonio, el bario y el plomo. Se observan estos tres elementos en el fulminante de la munición de la siguiente manera:

- El iniciador: estifnato de plomo, reacciona al contacto con la aguja percutora.
- El oxidante: nitrato de bario, el cual aporta el oxígeno necesario para la reacción.
- El combustible: sulfuro de antimonio.

La cantidad de antimonio, bario y plomo que se deposita en las manos de los disparadores depende de diversos factores, tales como el tipo de arma, munición, condiciones ambientales, la actividad del disparador, el tiempo transcurrido entre disparo y toma de muestras (Schwoeble, A 2000 y Smyth, 2008)

La forma en que los disparadores detectan los elementos removidos de las manos depende de la calidad de la muestra, de las circunstancias y de la técnica analítica utilizada.

Ventajas de la Virtopsia y la espectrometría de masas en medicina forense

La virtopsia ha marcado un hito en el análisis post-mortem, ofreciendo múltiples ventajas sobre las técnicas tradicionales. Estas ventajas no solo incrementan la precisión y eficacia del proceso, sino que también tienen consecuencias éticas y prácticas significativas.

- **Protege la integridad del cuerpo**

Una de las ventajas más destacadas de la virtopsia radica en su habilidad para preservar la integridad física del ser humano. Dado que no se requieren incisiones, se mantiene el respeto por el cuerpo, lo cual es especialmente relevante en contextos culturales o religiosos en los que la preservación del cuerpo es fundamental.

- **Precisión en los hallazgos**

A través de las imágenes detalladas proporcionadas por las tecnologías de imagen, tales como la TC y la RM, los patólogos pueden detectar con mayor precisión anomalías internas, lesiones y otras circunstancias que pueden ser difíciles de detectar en una autopsia convencional. Esta precisión es esencial para determinar la causa de la muerte de manera precisa.

- **Rapidez y eficiencia**

La virtopsia brinda la oportunidad de llevar a cabo análisis forenses en un lapso significativamente menor en comparación con las autopsias tradicionales. Esta eficacia no solo es beneficiosa en términos de tiempo, sino también en la administración de recursos, lo cual puede ser fundamental en situaciones con un gran número de casos que requieren un análisis forense.

- **Menos impactos en la salud pública**

Dado que se trata de un método no invasivo, la virtopsia disminuye significativamente el peligro de contaminación o la propagación de patologías infecciosas. En el contexto de brotes o pandemias, la protección del personal médico y la salud pública es fundamental.

- **Aplicación en investigaciones criminales**

En el ámbito de la investigación criminal, la virtopsia se ha convertido en un instrumento invaluable. Es factible para los investigadores obtener una evidencia detallada sin alterar el estado físico del cadáver, lo cual resulta relevante en la recolección de pruebas.

La espectrometría de masas (EM) a su vez es una herramienta eficaz en la medicina forense, otorgando diversas ventajas significativas, tales como:

1. Alta sensibilidad: Es importante detectar sustancias en concentraciones muy altas, especialmente si las muestras son limitadas o degradadas.
2. Especificidad: Se pueden detectar compuestos específicos en función de su masa, lo cual disminuye las posibilidades de falsos positivos al diferenciar entre compuestos con masas similares.
3. Análisis Multicomponente: La combinación de múltiples sustancias simultáneamente en una muestra resulta beneficiosa para la investigación.
4. Detección de metabolitos: La identificación no solo se compone de drogas y toxinas, sino también de sus metabolitos, lo cual puede ser fundamental en la comprensión de las circunstancias del daño o la intoxicación.
5. Versatilidad: Se puede aplicar a una variedad de tipos de muestras, como sangre, orina, tejidos, y otros fluidos biológicos, lo que la convierte en una herramienta flexible para

diferentes tipos de análisis forenses.

6. Análisis Cuantitativo: Proporciona datos cuantitativos precisos sobre la concentración de una sustancia, lo cual es fundamental en casos legales donde se requiere un conocimiento exacto de las cantidades involucradas.
7. Investigación de Sustancias Nuevas: Es útil en la identificación de nuevas drogas o sustancias que pueden no estar presentes en bases de datos estándar, ayudando a las autoridades a mantenerse al día con las nuevas tendencias en uso de drogas.
8. Análisis de isótopos: Puede analizar isótopos estables, lo que puede ser útil en estudios de trazado y verificación de origen de sustancias, especialmente en casos de homicidio o en la identificación de restos.

Estas ventajas hacen que la espectrometría de masas, al igual que la virtopsia sean herramientas cruciales en la medicina forense moderna.

Estudios de Casos Notables

Entre los estudios de casos notables en donde se ha utilizado la virtopsia es para evaluar los cambios microestructurales a través de la imagen de relación de transferencia de magnetización estableciendo que la muerte ha sido por causas cardiovasculares y no por otra razón.

En los casos de ahogamiento la autopsia virtual con la técnica de la tomografía computarizada ha permitido detectar el líquido en el sistema digestivo, respiratorio y circulatorio; así como la presencia de líquido espumoso en las vías respiratorias y depósitos en los tractos respiratorio y digestivo. (Jian, et al., 2019)

Para el tema del ahorcamiento, la autopsia virtual, utilizando la resonancia magnética se hace más efectiva, pues, es muy sensible en la diferenciación de tejidos, fluidos y estructuras en el momento de determinar el diagnóstico de la muerte. (Heimer, et al., 2019)

Durante la epidemia de fiebre amarilla en Brasil, 2018; se utilizó la autopsia virtual en 20 cadáveres y se logró determinar la causa de la muerte en el 100 % de los 20 cadáveres. (Almeida, et al., 2019)

Fariña, et al., 2002 nos dice que la autopsia virtual utilizando la ecopsia o autopsia ultrasonográfica puede ser efectiva en los casos en donde los familiares se niegan a realizar la autopsia convencional. Esto fue comprobado en España cuando en el Colegio de Madrid se realizaron 100 ecopsias de cadáveres a los cuales ya se le habían realizado la autopsia convencional,

de los cuales el 85% de los dictámenes fueron confirmados.

Referente a la espectrometría de masas ha sido usada para analizar las moléculas no iónicas volátiles pequeñas con ionización electrónica y química para determinar qué tipo de sustancia se encontraba en el lugar de los hechos. También se han analizado moléculas no polares y polares junto a sus metabolitos que existen normalmente en muestras biológicas.

Desafíos y limitaciones

Entre los desafíos de la virtopsia y la espectrometría de masas está en desarrollar un método, procedimiento o protocolo estandarizado que evite los sesgos o diferencias en las interpretaciones de los resultados.

En el caso de la Virtopsia, cuando se aplica para la identificación de causas por muerte cardiovasculares, el desafío sería diferenciar patrones de disecciones de la aorta y la ruptura de la pared del miocardio debido a un infarto. A la vez diferenciar el ahogamiento con un edema pulmonar cardiogénico y otras complicaciones cardíacas similares

Dentro de las limitaciones de la virtopsia y la espectrometría de masas podemos mencionar los sesgos potenciales en la selección de los casos y la interpretación de los resultados, que puede, en algún momento, afectar la validez de los hallazgos, pues, no existe una metodología o un procedimiento estándar para realizarlas.

La obtención general de los resultados puede ser preocupante debido a que puede existir diferencias en la infraestructura de los laboratorios, unos con mayor tecnología que otros; a la vez, la poca capacitación del personal forense en el uso de esta tecnología puede limitar la aplicabilidad de los métodos en diversas regiones poblacionales del mundo. A lo anterior hay que sumarle su costo y disponibilidad de recursos tecnológicos que puede ser limitada en gran parte de las zonas del mundo.

Específicamente, en la espectrometría de masas, la inadecuada preparación de la muestra junto a los efectos de la matriz pueden sesgar los resultados, de igual manera, como se mencionó anteriormente, son equipos de alta tecnología y por ende muy costosos con muy poco personal capacitado para operar estos equipos y sobre todo que tengan expertiz forense para utilizarlos. Y no podemos dejar de mencionar que no todos los compuestos se pueden ionizar mediante esta técnica, por lo que, en muchas ocasiones se necesitan las llamadas técnicas complementarias.

El futuro de la Medicina Forense

La integración de nuevos algoritmos de la inteligencia artificial permitirá acelerar el proceso de diagnóstico dando como resultado la automatización de la identificación de anomalías y una división por segmentos más eficiente de todos los órganos y tejidos en las imágenes, garantizando una detección más certera de patologías, lesiones y en el caso que nos compete, determinar la causa de la muerte dentro de un proceso judicial.

Por el momento se recomienda hacer la autopsia convencional y a la vez la autopsia virtual para mejorar la confiabilidad de todas las intervenciones forenses. No podemos pasar por alto el hecho de que los médicos forenses tendrán que tener otras habilidades tales como: el manejo e interpretación de la tomografía computarizada, la resonancia magnética y el ultrasonido; pudiendo de esta forma surgir un profesional denominado radiólogo forense o médico forense virtual.

En cuanto a la espectrometría de masas se pretende que en el futuro pueda analizar sustancias psicoactivas que nunca antes se habían detectado, lo que representa un futuro prometedor en el avance de la toxicología forense.

Por otro lado, la espectrometría de masas permitirá determinar de forma casi certera, a través de olores volátiles; el sexo, la edad y la raza. Un ejemplo de esto son los estudios recientes que determinan que a través del olor que dejan las manos en una escena del crimen se pudo determinar en un 96% el sexo, la edad y la raza; sin haber contado con una muestra de ADN.

Aspectos Éticos y legales

En cuanto a los fundamentos legales de la virtopsia y la espectrometría de masas, no existen tácitamente en ninguna legislación del mundo. Es decir, no se establece de manera precisa la utilización de estas técnicas en las morgues judiciales, y por ende, para la ayuda en materia de justicia.

No obstante, en algunos países han tomado la iniciativa de utilizar estas técnicas para casos específicos. En Francia, por ejemplo, se está tratando de utilizar un día a la semana el uso de la virtopsia; en Inglaterra, la causa se ha utilizado para determinar la causa de muerte de fetos o niños menores de 1 año.

En Suecia se está creando una herramienta tecnológica que recopila las imágenes de cadáveres creando desde ahora un banco de datos (Thayyil, et al., 2013). En Alemania, debido a que es una técnica no invasiva, se usa en la gran mayoría del territorio. Israel e Irak, países en constante

guerras, la están empezando a utilizar tanto la virtopsia como la espectrometría de masas para identificar, reconstruir y recopilar información de cadáveres (Alahmari, 2002).

Interdisciplinariedad en la medicina forense

A lo largo de este escrito ha quedado reflejado que la virtopsia y la espectrometría de masas requieren de una expertiz que va más allá de una preparación como médico forense o médico legista, pues, se requiere de estar relacionados con profesionales de la medicina en general, de la medicina radiológica, de la medicina quirúrgica, de la biología, de la química, de la toxicología. En general de la mayoría de las ciencias con la que se relaciona la medicina Forense y las propias ciencias que son ramas de la medicina forense.

Figura 3.



CONCLUSIONES

En conclusión, la virtopsia y la espectrometría de masas se han consolidado como herramientas fundamentales en la medicina forense, ofreciendo enfoques innovadores para la investigación de fallecimientos sospechosos y la identificación de sustancias en muestras biológicas. La virtopsia, al proporcionar la visualización tridimensional de los órganos y tejidos, brinda una opción menos invasiva a la autopsia tradicional, lo cual puede suponer un menor impacto para las familias afectadas por los fallecidos.

Por su parte, la espectrometría de masas, con su elevada sensibilidad y especificidad, posibilita la identificación y cuantificación de drogas, toxinas y otros elementos de interés en los casos de investigación forense.

Estas tecnologías no solo incrementan la precisión en el diagnóstico de la causa de muerte, sino que también aumentan las posibilidades de investigación, lo cual posibilita la resolución de casos que, de otra manera, podrían quedar sin soluciones.

Dado que estas herramientas siguen avanzando, su integración en los protocolos forenses podría cambiar de manera significativa la práctica forense, estableciendo un nuevo enfoque de excelencia en la búsqueda de la verdad tras cada muerte. La conexión continua entre la ciencia forense y la tecnología a largo plazo promete un futuro en el que se pueda llevar a cabo una justicia más efectiva y humanitaria.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angélica N. García-Robelto, Alejandro Betín-Isaza, Aura M. Gil-Villa. (2019). Virtopsia. Su pertinencia como herramienta de apoyo judicial en Colombia. *Revista Memorias Forenses*, 3(2019), 45–58.
- Baena S. Densitometría y data de la muerte. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Junio de 2001.
- Carolina Gallego Londoño, Diego Fernando Afanador Restrepo, Maria Camila Dávila Castañeda, Sebastián Andrade Ramírez. . La evolución de la Virtopsia, las ventajas frente a la autopsia y el impacto en el área de la salud: Una scoping review. *J. health med. sci.*, 10(3):11-20, 2024.
- CDC. (2024). High-Resolution Mass Spectral Libraries for Drug and Toxin Analysis. Center for disease control and prevention. <https://www.cdc.gov/chemical-threats-and-toxins-laboratory/php/opioids-laboratory/high-resolution-mass-spectral-libraries-for-opioid-analysis.html>
- Euroinnova. (2020). ¿En qué consiste la virtopsia? Euroinnova. <https://www.euroinnova.com/medicina/articulos/virtopsia>
- Fariña, J.; Millana, C.; Fdez-Aceñero, J.M. Ultrasonographic autopsy (echopsy): A new autopsy technique. *Virchows Archiv*, 440: 635-639, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00428-002-0607-z>
- Gallo, R. Á., de la Carrera, N. D. D., & Foyo, R. (2023). Relevancia de la virtopsia como método de inspección corporal no invasivo en las Ciencias Forenses.
- Garfia A. Técnicas de autopsia en el fin del milenio. Las opsias. Panorama general e indicaciones. Curso sobre “Técnica avanzada de autopsia”. Centro de Estudios Judiciales. Administración de Justicia. Madrid 26-28 de octubre de 1998.
- Jian, J.Q.; Liu, N.G.; Chen, Y.J. Research progress in virtopsy of drowning. *Journal of Forensic Medicine*, 35(6): 328-331, 2019. <https://doi.org/10.12103/j.issn.1004->

5619.2019.06.013

- Jiménez, M. C. M. (2013). Validación del método de análisis de residuos de disparo por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente en frotis de manos, en el Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses regional Bogotá. *Antistio: Revista del Instituto Nacional de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Colombia*, 1(1), 8-12.
- Longdom. (2024). Espectroscopia de Masas en Estudios Forenses. Longdom. <https://spanish.longdom.org/scholarly/mass-spectroscopy-in-forensic-studies-journals-articles-ppts-list-1978.html>
- Mass Spectroscopy in Forensic Studies (30 de noviembre de 2024) <https://spanish.longdom.org/scholarly/mass-spectroscopy-in-forensic-studies-journals-articles-ppts-list-1978.html>
- Robb, RA. Three-Dimensional Visualization in Medicine and Biology. En: Bankman IN. *Handbook of Medical Imaging: Processing and Analysis*. Academic Press, 2000 pp. 685-712.
- Schwoeble A, Exlin D . *Current Methods in Forensic Gunshot Residues Analysis*. Portland: CRC Press; 2000. <https://doi.org/10.1201/9781420042573>
- Skoog D. *Principios de análisis instrumental*. Quinta edición. Madrid: McGraw-Hill; 2001.
- Taylor H. *Inductively Coupled Plasma Mass spectrometry. Practices and Techniques*. California: Academic Press; 2001. <https://doi.org/10.1016/B978-012683865-7/50006-5>
- Thali MJ, Braun M, Buck U, Aghayev E, Jackowski C, Vock P, Sonnenschein M, Dirnhofer R. VIRTOPSY--scientific documentation, reconstruction and animation in forensic: individual and real 3D data based geo-metric approach including optical body/object surface and radiological CT/MRI scanning. *J Forensic Sci* 2005 Mar;50(2):428-42.
- Thali MJ, Yen K, Schweitzer W, Vock P, Boesch C, Ozdoba C, Schroth G, Ith M, Sonnenschein M, Doernhoefer T, Scheurer E, Plattner T, Dirnhofer R., Virtopsy, a new imaging horizon in forensic pathology: virtual autopsy by postmortem multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI)--a feasibility study. *J Forensic Sci* 2003 Mar;48(2):386-403.
- Thayyil, S.; Sebire, N.J.; Chitty, L.S.; Wade, A.; Chong, W.; Olsen, O.; Gunny, R.S.; Offiah, A.C.; Owens, C.M.; Saunders, D.E.; Scott, R.J.; Jones, R.; Norman, W.; Addison, S.; Bainbridge, A.; Cady, E.B.; Vita, E.D.; Robertson, N.J.; Taylor, A.M.; MARIAS collaborative group. Post-mortem MRI versus conventional autopsy in fetuses and children: a prospective validation study. *The Lancet*, 382(9898): 223-233, 2013. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(13\)60134-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(13)60134-8)

- Thomas R. Practical Guide to ICP-MS. New York: Marcel Dekker Inc.; 2004. <https://doi.org/10.1201/9780203027073>
- Yen K, Vock P, Tiefenthaler B, Ranner G, Scheurer E, Thali MJ, Zwyzgart K, Sonnenschein M, Wiltgen M, Dirnhofer R. Virtopsy: forensic traumatology of the subcutaneous fatty tissue; multislice computed tomography (MSCT) and magnetic resonance imaging (MRI) as diagnostic tools. J Forensic Sci 2004 Jul;49(4):799-806.