

RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL COMO TÉCNICA DE RECREACIÓN DE PROTOTIPOS EN EVALUACIONES DE ESCENAS DEL CRIMEN: UNA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Virtual reconstruction as a prototype recreation technique in crime scene evaluations: A bibliographic review

Héctor David Pulgar Haro ⁽¹⁾
hpulgar@esPOCH.edu.ec

Vanessa Elizabeth Alcocer Guamán ⁽¹⁾
vanessa.alcocer@esPOCH.edu.ec

Karol Denisse Mera Guerrero ⁽¹⁾ *
karol.mera@esPOCH.edu.ec

Karen Melissa Carrasco Naranjo ⁽¹⁾
karen.carrasco@esPOCH.edu.ec

⁽¹⁾ Carrera de Medicina, Facultad de Salud Pública, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Autor de correspondencia:

Correo electrónico: karol.mera@esPOCH.edu.ec / Teléfono: +593 98 200 3664

RESUMEN

Introducción: La reconstrucción virtual es una técnica que implica la aplicación de procedimientos digitales y el uso de software 3D especializado para representar visualmente el escenario en el cual ocurrió el acto criminal. **Objetivo:** recabar información actualizada sobre la reconstrucción virtual como técnica de recreación de prototipos en evaluaciones de escenas del crimen que orienten al estudio de los médicos forenses y estudiantes de medicina. **Metodología:** Se realizó una revisión bibliográfica no sistemática de tipo narrativa, mediante la búsqueda de artículos científicos de bases de datos de alto impacto como PubMed, Elsevier, Scopus, Web of Science, entre otros. Se optó por realizar una selección de las fuentes con mayor información acerca del tema entre todos los autores. **Resultados:** Se encontraron 54 artículos, de los cuales únicamente 31 cumplieron con los criterios para ser incluidos en la revisión bibliográfica. **Discusión:** Las técnicas de imágenes tridimensionales permiten la documentación permanente no invasiva y no destructiva de personas y escenas del crimen. La reconstrucción virtual debe brindar la percepción que está realmente en el lugar representado. Las actividades inmersivas se utilizan para potenciar el aprendizaje en entornos que recrean escenarios tridimensionales reales o imaginarios, generados por computadora, con los que se puede interactuar. **Conclusión:** La tecnología avanzada, como la realidad virtual, fotogrametría, escaneo láser y sensores LiDAR, ha revolucionado la reconstrucción de escenas del crimen. Estas tecnologías no solo optimizan la reconstrucción de escenas del crimen, sino que también impulsan la educación y preparación de futuros expertos forenses.

Palabras claves: *Crimen, realidad virtual, imagen forense, medicina legal.*

ABSTRACT

Introduction: Virtual reconstruction is a technique that employs digital procedures and the utilisation of specialised three-dimensional software to create a visual representation of the scene in which the criminal act occurred. **Objective:** to collect updated information on virtual reconstruction as a technique for recreating prototypes in crime scene evaluations that guide the study of forensic doctors and medical students. **Methodology:** A non-systematic narrative bibliographic review was conducted through the examination of scientific articles from high-impact databases, including PubMed, Elsevier, Scopus, Web of Science, and others. It was determined that the most appropriate course of action would be to select the sources that provided the most comprehensive information about the topic, as identified by all the authors. **Results:** 54 articles were found, of which only 31 met the criteria to be included in the bibliographic review. **Discussion:** Three-dimensional imaging techniques permit the non-invasive and non-destructive permanent documentation of individuals and crime scenes. It is essential that the virtual reconstruction provides the impression of being situated in the represented location. Immersive activities are employed to facilitate enhanced learning in environments that recreate authentic or fictional three-dimensional scenarios, generated by computer, with which the user can interact. **Conclusion:** Advanced technology, such as virtual reality, photogrammetry, laser scanning, and LiDAR sensors, has revolutionized crime scene reconstruction. These technologies not only streamline crime scene reconstruction, but also boost the education and preparation of future forensic experts.

Keywords: *Crime, virtual reality, forensic imaging, forensic medicine.*

1. Introducción

La técnica de reconstrucción virtual se basa en la implementación de métodos digitales y el empleo de programas tridimensionales (3D) avanzados para recrear de manera visual el sitio donde tuvo lugar el delito. Esto permite llevar a cabo un estudio detallado de varios elementos que jugaron un papel en su ocurrencia (1).

Es crucial enfatizar que estas reconstrucciones deben ser realizadas por expertos adecuadamente formados y con experiencia en el uso de software 3D, asegurando de esta manera su exactitud y confiabilidad. Además, es esencial llevar a cabo una investigación rigurosa antes de comenzar la reconstrucción virtual para garantizar que se consideren todos los detalles pertinentes y se evite la falta de información crucial (2,3).

Las reconstrucciones virtuales no solo facilitan la comprensión y el análisis del suceso en cuestión, sino que también pueden emplearse para visualizar y corroborar otras pruebas existentes en el caso, como pueden ser las fotografías o los testimonios (4).

Las actividades de inmersión se emplean para mejorar el aprendizaje en contextos que simulan escenarios tridimensionales, ya sean reales o ficticios, creados por ordenador. Estos permiten la interacción y proporcionan la impresión de estar físicamente presentes en dicho escenario en ese instante (5).

La Realidad Virtual, que forma parte de la realidad mixta, es un sistema computacional que posibilita la creación de una simulación de la realidad. Se distingue por su carácter inmersivo, ya que permite al usuario, a través de un visor, adentrarse en escenarios tridimensionales y de 360 grados. En resumen, la realidad virtual implica la inmersión en una simulación digital de un mundo donde el usuario puede interactuar con los objetos y el entorno. Por ello, se la considera una herramienta esencial para el aprendizaje inmersivo, ya que facilita la exploración segura de lugares, situaciones e historias (6).

Por ende, el objetivo de este trabajo es recabar información actualizada sobre la reconstrucción virtual como técnica de recreación de prototipos en evaluaciones de escenas del crimen que orienten el estudio de los médicos forenses y estudiantes de medicina.

2. Métodos

2.1 Criterios de elegibilidad: Se realizó una revisión bibliográfica no sistemática de tipo narrativa, mediante la búsqueda de artículos científicos de bases de datos de alto impacto como PubMed, Elsevier, Scopus, Web of Science, entre otros; seleccionando aquellos documentos que brinden la información más actualizada sobre las temáticas abordadas en el presente trabajo de investigación.

2.2 Fuentes de información: Se aplicaron los siguientes criterios a las fuentes encontradas:

Criterios de inclusión:

- Fecha de publicaciones de los últimos 5 años (2019-2024)
- Idioma inglés, español o portugués.
- Tipo de estudio: Revisiones sistemáticas, estudios observacionales, reportes.
- Tipo de documentos: Artículos científicos, tesis y/o trabajos de titulación de 3er y 4to nivel, revisiones bibliográficas, metaanálisis.

Criterios de exclusión:

- Publicaciones incompletas.
- Publicaciones replicadas en varias bases de datos.
- Publicaciones sin autor o fecha.
- Publicaciones con resultados con baja potencia o relevancia.

2.3 Estrategia de búsqueda: Para este fin, se realizó una búsqueda de bases de datos de alto impacto como PubMed, Elsevier, Scopus, Web of Science y palabras clave como: Crimen, realidad virtual, imagen forense, medicina legal, las cuales se vincularon mediante operadores booleanos, entre los que figuran AND, OR y NOT.

2.4 Proceso de selección de los estudios: Se tomó en cuenta estudios observacionales, experimentales, revisiones sistemáticas, metaanálisis, artículos y documentos publicados en los últimos 5 años con datos completos como autor, fecha de publicación, editorial y que contengan información relevante de la reconstrucción virtual como técnica de recreación de prototipos en evaluaciones de escenas del crimen, se realizó una revisión principal de cada título, contenido y se optó por seleccionar las fuentes

con mayor información acerca del tema entre todos los autores.

2.5 Proceso de extracción de los datos: Para el procesamiento y análisis de datos, se empleó la matriz de resumen bibliográfico en la que se sintetizaron los hallazgos de las fuentes, esta herramienta permitió trabajar con objetividad y precisión aspectos generales de la reconstrucción virtual como técnica de recreación de prototipos en evaluaciones de escenas del crimen. Se utilizó la herramienta online de Google Docs y el paquete de Microsoft Office para la organización y sincronización de la evidencia recabada.

2.6 Consideraciones éticas: Para la selección de fuentes y análisis de datos se tomó en cuenta credibilidad y objetividad ya que al utilizar fuentes no confiables puede existir difusión errónea de información.

2.7 Limitaciones: Precisión de datos, ya que en el caso de existir datos incompletos la reconstrucción no puede ser representativa.

persisten desafíos en la implementación de estas técnicas, especialmente en términos de costos y la necesidad de una formación especializada.

Una vez examinadas las fuentes de datos, se encontraron 54 artículos relevantes que abordan la reconstrucción virtual como técnica de recreación de prototipos en evaluaciones de escenas del crimen. En la sistematización de búsqueda en bases de datos de plataformas científicas en la web, se identificaron inicialmente 43 documentos tras eliminar publicaciones duplicadas. Después de la lectura de títulos y resúmenes, se seleccionaron 35 referencias para incluir en el análisis, pero 4 de ellas fueron descartadas por no cumplir con los criterios de selección. Finalmente, se incluyeron 31 documentos en la investigación, los cuales proporcionaron la información necesaria para comprender el impacto y las implicaciones de la reconstrucción virtual en la evaluación de escenas del crimen. A pesar de las preocupaciones mencionadas, la literatura sugiere que el uso de esta técnica continuará evolucionando, siendo crucial considerar tanto sus beneficios como sus posibles limitaciones en el contexto forense.

»» 3. Resultados, de búsqueda bibliográfica

Los estudios revisados demuestran un consenso en relación con el impacto significativo que la reconstrucción virtual está teniendo como técnica de recreación de prototipos en la evaluación de escenas del crimen. Se identificaron tres áreas principales de impacto: precisión en la recreación de los hechos, eficacia en la presentación de pruebas y avances en la formación forense. Varios autores coinciden en que la reconstrucción virtual ha mejorado la precisión en la recreación de los hechos, permitiendo a los investigadores reproducir escenarios con un alto nivel de detalle y fidelidad. Además, se observó una mayor eficacia en la presentación de pruebas en el ámbito judicial, gracias a la capacidad de la reconstrucción virtual, para ofrecer representaciones visuales claras y comprensibles de las escenas del crimen. Sin embargo, se señalan algunas preocupaciones éticas en torno a la manipulación de los datos virtuales y la posible distorsión de la realidad en la recreación de los hechos, argumentando algunos estudios que es esencial mantener un equilibrio entre la tecnología y la integridad de la investigación forense. En cuanto a la formación forense, la reconstrucción virtual ha proporcionado nuevas herramientas educativas que mejoran la capacitación de los profesionales al permitir la simulación de diversas situaciones. No obstante,

»» 4. Discusión

Discusión, de los principales hallazgos de la búsqueda bibliográfica

4.1 Tecnología de realidad virtual en la reconstrucción de escenas del crimen

Los hallazgos presentados son consistentes con estudios previos que destacan la relevancia de las tecnologías de RV como herramientas digitales clave para sumergir a los usuarios en universos creados digitalmente. Estas tecnologías han demostrado ser efectivas en la reconstrucción y análisis de escenarios complejos, según lo documentado en la literatura. (7).

De manera similar a investigaciones anteriores, se confirma que la fotogrametría es una técnica robusta para la generación de modelos 3D precisos y coloreados a partir de imágenes 2D. Este método, que se basa en principios de triangulación, se destaca por su flexibilidad, permitiendo la creación de modelos tridimensionales cuya resolución y detalle dependen de la cantidad de fotos, la resolución de la cámara y la proximidad al objeto de interés. Estudios previos han demostrado que la fotogrametría es eficaz no solo para documentar amplias escenas de delitos, sino también para capturar detalles tan finos como huellas dactilares.

En concordancia con lo reportado en la literatura, el escaneo de superficies continúa siendo una técnica válida para la documentación en 3D. Tanto los escáneres láser como los de luz estructurada, que también se basan en la triangulación, ofrecen una precisión notable en la captura de detalles superficiales, aunque con variaciones en rango, precisión y costo, dependiendo del tipo de escáner utilizado (8).

El auge reciente en la utilización de sensores LiDAR ha sido igualmente respaldado por los resultados observados. Estos dispositivos, que emplean tecnología de detección y rango de luz infrarroja pulsada, han demostrado ser herramientas innovadoras para la documentación corporal, facilitando la creación de modelos 3D con una mayor flexibilidad y facilidad de uso en comparación con la fotogrametría. Al igual que en estudios previos, se observa que la incorporación de LiDAR en dispositivos móviles como smartphones y tablets ha revolucionado la práctica forense, permitiendo evaluaciones inmediatas en la misma sala de autopsias. La aplicación Recon-3D, diseñada específicamente para dispositivos Apple, ha mostrado su eficacia en contextos forenses, lo que respalda su creciente adopción en la práctica.

La Inteligencia Artificial (IA) emerge como una herramienta transformadora en la reconstrucción de escenas del crimen, según lo demostrado en estudios recientes. La IA ha mostrado ser capaz de procesar grandes volúmenes de datos, identificar patrones relevantes y ofrecer análisis precisos que podrían pasar desapercibidos para los investigadores humanos. Esta capacidad de la IA no solo mejora la detección de evidencias significativas, sino que también permite la reconstrucción de escenas complejas e incluso la predicción de comportamientos delictivos futuros, alineándose con lo reportado en la literatura actual (9–11).

4.2 Métodos de captura de datos en 3D para la reconstrucción de escenas del crimen.

Las técnicas de imágenes en 3D han demostrado ser herramientas esenciales para la documentación duradera, no invasiva y no destructiva de individuos y escenas delictivas. Estas técnicas capturan detalles tanto internos como externos de los cuerpos y las pruebas en la escena del crimen, generando modelos 3D precisos y de alta definición. Como se ha documentado en estudios previos, estos modelos no solo sirven como instrumentos de visualización, sino que también son fundamentales para análisis computarizados sofisticados, facilitando una comprensión más profunda del

escenario investigado (8). Además, las experiencias de RV permiten a los usuarios sumergirse en una escena, observando y registrando comportamientos y acciones como si fueran testigos presenciales. La revisión y el análisis posterior de estos registros aportan un valor significativo a las investigaciones y al entendimiento del escenario, y como ha sido reportado, estos registros pueden ser utilizados como evidencia en juicios legales (12).

Primero, es necesario generar los datos 3D, lo que implica utilizar el método adecuado para documentar un objeto, lugar o hallazgo médico específico. Segundo, todos los datos deben estar listos para la reconstrucción. En esta etapa, se extraen modelos poligonales de estructuras anatómicas importantes de los conjuntos de datos volumétricos de exámenes médicos, se calculan modelos fotogramétricos y sus texturas a partir de fotografías digitales 2D y se preparan los personajes para la animación al incorporarlos a un sistema esquelético cinemático. Si es necesario, se reduce la cantidad de polígonos de los modelos resultantes o se reconstruyen partes de una escena con datos 3D existentes basados en primitivas de polígonos bajos. El objetivo de este paso es convertir todos los datos en una malla poligonal e importarlos al software de animación 3D. En el tercer paso, la persona encargada de la reconstrucción consulta con expertos en el campo para interpretar los datos en el contexto de la pregunta forense que debe responderse. Debido a la complejidad y la cantidad de datos que pueden estar disponibles, este paso puede llevar un tiempo considerable. Posteriormente, cuando las pistas coinciden, se realiza la reconstrucción y se crean las visualizaciones, ya sea como representaciones 2D o como escenas de realidad virtual (VR). Por lo tanto, la reconstrucción final puede consistir en múltiples escenarios plausibles que dependen de la cuestión forense y de las huellas, pruebas y materiales disponibles (13,14).

En el estudio "Comparison of superficial wound documentation using 2D forensic photography, 3D photogrammetry, Botscan© and VR with real-life examination" se comparó el examen real de heridas superficiales utilizando cuatro métodos diferentes de documentación técnica y visualización. Se equipó un maniquí con 42 pegatinas de lesiones artificiales en cuanto a orientación, forma, color, tamaño, bordes de la herida, esquinas de la herida y mecanismo de lesión sospechoso y luego se aplicaron los diferentes métodos. Dos patólogos forenses certificados examinaron visualmente las heridas superficiales directamente en el maniquí. Estos resultados se compararon con un

examen utilizando fotografía forense 2D estándar; Fotografía en 2D mediante el sistema multicámara Botscan (c), que incluía posiciones de visualización predefinidas en todo el cuerpo; y reconstrucción fotogramétrica 3D basada en imágenes visualizadas tanto en pantalla como en VR mediante un head-mounted display (HMD). Los resultados del examen de referencia mostraron que los dos patólogos forenses tenían una concordancia entre lectores que oscilaba entre el 69% en la orientación y el 11% en el tamaño de las heridas. No hubo diferencias significativas para ninguno de los cuatro métodos en comparación con el estándar de oro, lo que cuestiona el papel del examen de la vida real y la fotografía 2D como los enfoques de documentación más confiables. El estudio concluyó que se necesitan más estudios con lesiones reales para respaldar la evaluación de que los métodos de examen técnico que implican sistemas multicámara y visualización 3D para el examen de todo el cuerpo, podrían ser una alternativa válida en la futura documentación forense (15).

Lo que hace que estas reconstrucciones sean prolongadas y, por ende, costosas, es el hecho de que, aunque los datos son en 3D, la pantalla usada para las reconstrucciones, así como los dispositivos de entrada (el ratón y el teclado del ordenador), operan en 2D. Debido a la falta de información y capacidades de entrada, ajustar varios modelos poligonales a la posición requerida puede ser laborioso y puede necesitar un ajuste constante de la perspectiva de la ventana gráfica y del objeto 3D.

4.3 Software y hardware utilizados en la realidad virtual para la reconstrucción forense.

La reconstrucción virtual, para ser efectiva, debe proporcionar una sensación auténtica de estar presente en el lugar representado. Este concepto ha sido respaldado por estudios previos que demuestran la importancia de la inmersión para una interpretación precisa de las escenas del crimen. Para una reconstrucción virtual, el operador forense debe usar una computadora con características específicas que permitan mejorar la velocidad de procesamiento y la velocidad de ejecución. En términos generales, la velocidad de procesamiento se refiere al tiempo que la computadora tarda en analizar la información, renderizar, etc.; mientras que la velocidad de ejecución se define como el tiempo de respuesta entre la acción solicitada por el operador y la respuesta del ordenador (16).

El hardware desempeña un papel crucial en este proceso, y la literatura ha señalado consistentemente al procesador como el componente más esencial

de cualquier computadora. Estudios anteriores han demostrado que cuanto más rápido es el procesador, mayor es la velocidad de procesamiento y ejecución, lo que se traduce en una reconstrucción más precisa y eficiente. Del mismo modo, la tarjeta gráfica, que se considera como una segunda computadora conectada a la placa base, se encarga de procesar las imágenes, realizando la labor intensiva de toda animación digital. Este componente, que incluye su propio procesador y memoria RAM interna, ha sido identificado en estudios recientes como un factor que aligera la carga de los demás componentes del PC, mejorando la velocidad general. La memoria RAM, que tiene la tarea de asistir al procesador con la recopilación de la información, pero solo de los programas en uso. Es una memoria a corto plazo que ayuda al PC en su funcionamiento. Podría ejemplificarse como una mesa de trabajo, cuanto más grande, más elementos se pueden apoyar y utilizar simultáneamente. El almacenamiento, actualmente existen discos duros de estado sólido que permiten un acceso más ágil y rápido entre el procesador y la información (10).

Por otro lado, el software es esencial para llevar a cabo una efectiva reconstrucción virtual. El equilibrio adecuado entre Operador, Hardware y Software incrementa las probabilidades de lograr una reconstrucción virtual eficaz en un tiempo razonable (16).

Algunos de los programas empleados para la reconstrucción virtual de la escena del crimen incluyen: Pix4D, que es reconocido como un innovador en el desarrollo de la creación de modelos 3D y mapeo de imágenes, y puede proporcionar una representación precisa y detallada de la escena del crimen. Añade detalles, iluminación y aspectos de movimiento utilizando software de terceros para mejorar la presentación en la sala de juicios utilizando nubes de puntos generadas por Pix4D e imágenes ortográficas mostradas a través de Realidad Virtual. Existen dos tipos de acceso al programa: la versión de prueba gratuita y la versión premium de pago. AGISOFT Metashape, por otro lado, es un software autónomo que realiza procesamiento fotogramétrico y genera datos espaciales 3D. La reurbanización de la escena del crimen es crucial, ya que este proceso proporcionará una visión clara de cómo se produjo el crimen. Con la ayuda de un dron, se tomarán imágenes de la escena del crimen automáticamente, y pueden pasar al siguiente paso, que es desarrollar la escena. AGISOFT Metashape juega un papel crucial en el desarrollo de escenas 3D y mapeo de imágenes (17,18). SIRV: Es un servidor que se encarga de procesar y optimizar imágenes. Ofrece

el servicio de procesamiento y optimización de las ideas proporcionadas por el usuario. SIRV se basa en un sitio web, es muy fácil de usar y no ocupa espacio en el dispositivo del usuario. SIRV ofrece una variedad de servicios, pero el más destacado son sus rotaciones de 360 grados, incluyendo Image Zoom. BLENDER: Es una aplicación informática multiplataforma, especializada en modelado, iluminación, renderizado, animación y creación de gráficos en 3D. También se utiliza para composición digital mediante la técnica de nodos procesales, edición de vídeo, escultura (incluye topología dinámica) y pintura digital (19). ADOBE FUSE: Es un software de Adobe que facilita la creación rápida de personajes humanos únicos para cualquier tipo de proyecto en 2D y 3D. Su interfaz gráfica es muy intuitiva y se parece a la mayoría de las aplicaciones informáticas. MIXAMO: Es una herramienta en línea, adquirida por Adobe, de uso gratuito, que permite animar a un personaje 3D creado por algún software, como podría ser Blender o, en este caso, Fuse. Este sitio cuenta con una amplia biblioteca de movimientos que se pueden asignar a nuestro personaje para animarlo (16,18,20).

UNITY: Unity es un programa que facilita la conexión de objetos 3D y otros elementos como cámaras, luces y más componentes para construir un escenario virtual ideal. Unity posibilita la creación de escenarios tridimensionales, combinando gráficos con programación que se maneja a través del lenguaje unityscript. Una de las ventajas de este software es que incluye scripts predefinidos, conocidos en la interfaz como assets, que contienen diferentes componentes que asisten en la creación de ciertas escenas donde los elementos que conforman el espacio virtual pueden interactuar de manera colectiva. En este programa, se pueden crear personajes, proporcionarles textura y movimiento, e incluso programarlos para que exhiban un comportamiento personalizado específico para luego ser implementados en otros aspectos o en otros programas de diseño o modelado (21).

4.4 Uso de la realidad virtual en la capacitación de investigadores y peritos forenses.

En el estudio multidisciplinario "Realidad virtual para la enseñanza y el aprendizaje en la investigación de la escena del crimen", se diseñó e implementó una aplicación de realidad virtual para la escena del crimen, que luego fue probada tanto por grupos de estudiantes de pregrado como de personal y estudiantes de posgrado. Mediante análisis cualitativos y cuantitativos, se evidenció que las aplicaciones de realidad virtual respaldan

el aprendizaje de habilidades prácticas para el procesamiento de la escena del crimen, este hallazgo se alinea con investigaciones que destacan el valor de la realidad virtual en la educación práctica, permitiendo una experiencia interactiva y diversa. Las sesiones prácticas basadas en realidad virtual tienen el potencial de enriquecer los cursos de ciencias forenses, al proporcionar una experiencia práctica rentable y la capacidad de trabajar de manera independiente y en una variedad de escenarios distintos. El estudio concluyó que la investigación simulada de la escena del crimen es un componente vital de la educación en ciencias forenses, aunque su implementación es costosa y presenta desafíos de accesibilidad. Los grupos reportaron altos niveles de satisfacción con el uso de la aplicación y hubo informes de efectos adversos (mareos) (22).

De manera similar, durante el programa de licenciatura en ciencias forenses en la Escuela de Justicia Penal (Universidad de Lausana), a medida que la simulación y supervisión de actividades realistas se volvían cada vez más desafiantes con un creciente número de estudiantes a lo largo de los años (de alrededor de 30 en 2016 a más de 60 en 2021), se inició un proyecto de innovación educativa destinado a implementar tecnologías digitales para respaldar a la facultad. Se introdujeron una herramienta de simulación de la escena del crimen por computadora (que permite a los estudiantes visualizar escenas del crimen en 360° y elementos relevantes) y una herramienta de comunicación (para simplificar y centralizar la comunicación entre los estudiantes y el personal docente). Antes de 2020, el curso de práctica forense se impartía completamente en persona sin tecnologías específicas, y completamente en línea en 2020 (debido a las restricciones sanitarias relacionadas con la pandemia de COVID-19). Finalmente, en 2021 se implementaron con éxito actividades tanto presenciales como en línea, combinando lo mejor de ambos enfoques en una modalidad de enseñanza híbrida. Se observó un aumento general en la satisfacción de los estudiantes y del personal docente con la implementación de estas herramientas. Esto fomentó el pensamiento crítico y, junto con un aumento de las interacciones estructuradas (tanto en línea como presenciales), permitió una experiencia de aprendizaje positiva y continua. Aunque las evaluaciones de estas tecnologías innovadoras fueron en general muy positivas, los estudiantes expresaron un deseo persistente de realizar ciertas tareas en el lugar y una preferencia por las interacciones en persona. Estos hallazgos sugieren que, si bien la integración de tecnologías digitales en la educación forense

ha sido exitosa, es importante mantener un equilibrio entre las metodologías tradicionales y las innovaciones tecnológicas para satisfacer las necesidades y expectativas de los estudiantes (23).

4.5 Casos de estudio que demuestren la eficacia de la realidad virtual en la resolución de casos criminales.

Ebert et al., (2014) crearon el primer prototipo de un sistema forense de realidad virtual en 2013, basado en el primer kit de desarrollo de Oculus Rift. Desde entonces, la tecnología ha continuado avanzando, mejorando la resolución de pantalla e incorporando características como controladores con seguimiento, HMD inalámbricos y realidad virtual a escala de habitación. En los últimos siete años, se han establecido tres aplicaciones clave de realidad virtual que se han aplicado a varios casos en el este de Suiza, y cuyos desarrollos han sido sugeridos por abogados y jueces estatales. Hasta ahora, utilizamos la realidad virtual para las siguientes aplicaciones:

- Para visualizar y presentar a las autoridades escenas del crimen en 3D (visualización).
- Como herramienta para que los expertos forenses realicen reconstrucciones en 3D (reconstrucción).
- Para registrar declaraciones de expertos o testigos en la escena documentada en 3D (visita a la escena del crimen).

Tras su desarrollo inicial en 2013, la realidad virtual se implementó en el Instituto de Medicina Forense de la Universidad de Zurich como una herramienta para trabajar en casos en 2017. Desde entonces, se han completado un total de quince solicitudes de casos, las dos más recientes en 2021. La mayoría de los casos estuvieron relacionados con homicidio o intento de homicidio, y una minoría de casos se centraron en agresión. En todos los casos que incluían testimonios de testigos, se debía cumplir con requisitos legales adicionales, como la obligación de grabar recorridos virtuales de la escena (en alemán "Augenschein") tanto para el tribunal como para futuras apelaciones. Además de la necesidad de registrar el uso de la realidad virtual, era necesario respetar los derechos de todas las partes involucradas en la audiencia de pruebas y el deber de proteger a esas partes. El aspecto más reciente es el derecho del público o de cualquier miembro acreditado de la prensa a participar en un juicio. Además, el último caso requirió una configuración multiusuario, de manera que los testigos, el tribunal, la defensa y la acusación pudieran visitar el lugar en realidad virtual simultáneamente (24).

4.6 Limitaciones y desafíos en la aplicación de la realidad virtual en la reconstrucción de escenas del crimen.

La efectividad de la tecnología de VR se basa en la exactitud y la completitud de los datos recogidos en la escena del crimen. La existencia de datos omitidos o incorrectos puede resultar en una reconstrucción defectuosa. Por lo tanto, es esencial que los investigadores aseguren que el proceso de recolección de datos sea íntegro y preciso, este aspecto es crucial, ya que investigaciones previas han demostrado que la precisión en la recopilación de datos es fundamental para la eficacia de las aplicaciones de VR en contextos forenses (25).

La realidad virtual está indiscutiblemente ligada al avance tecnológico. Implica la generación de ambientes artificiales con equipos informáticos que simulan la realidad que una persona puede percibir a través de sus sentidos. Esto representa una limitación significativa, ya que la habilidad de los sentidos humanos para apreciar detalles supera actualmente la capacidad de la tecnología para reproducirlos en varios aspectos, lo que resulta en la percepción de una realidad reducida y en algunos casos, insuficiente. Además de las limitaciones visuales, la inmersión en una realidad artificialmente creada implica involucrar a otros sentidos para acercarse a las condiciones reales de la vida humana. Por lo tanto, sería necesario involucrar el sentido de la orientación, el equilibrio, el movimiento y el tacto, principalmente, para mejorar la sensación de inmersión. En cuanto a la simulación de la orientación, el equilibrio y el movimiento, se logra en los equipos de realidad virtual actuales capturando la posición física del cuerpo del usuario mediante varios sensores o cámaras de posicionamiento y movimiento. Estos sensores realizan un seguimiento o "tracking" de la posición del usuario, y sus cambios de posición en tiempo real, generando cambios en tiempo real en la imagen que los visores envían al usuario de realidad virtual. Este no es un asunto trivial, ya que es esencial que este envío de información, conocido como latencia de respuesta, sea lo más exacto y rápido posible, ya que las posibles discrepancias entre lo que capta el sentido de la vista, y el de la orientación y el equilibrio pueden provocar mareos o náuseas en los usuarios de realidad virtual (26).

Aunque los fundamentos teóricos de la realidad virtual tienen ya varias décadas, su implementación práctica es un fenómeno bastante reciente. La creación de una realidad artificial que imite la realidad física exige altos estándares en términos de informática, reproducción visual, tecnología

óptica, seguimiento, etc., por lo que solo cuando todas estas tecnologías se han desarrollado suficientemente ha sido posible poner en práctica las primeras experiencias confiables. Dada la novedad de esta tecnología y su campo de estudio, es comprensible la falta de definición de muchos de sus estándares y posibilidades. Actualmente, esta nueva tecnología debe mucho al diseño de entornos tridimensionales digitales propios de otros campos como la arquitectura o el desarrollo de videojuegos. El hecho de heredar de estos campos muchos procedimientos y herramientas de desarrollo implica que el diseño y creación de aplicaciones, sistemas operativos y experiencias para realidad virtual no aprovechan todas sus posibilidades, y se necesita un periodo de transición en el que la realidad virtual desarrolle y estandarice sus propios parámetros de desarrollo y potencial. En este punto es donde la innovación científica de este campo adquiere un valor crucial, ya que aún hay muchas posibilidades por explorar para aprovechar todo el potencial de la realidad virtual en los diversos campos científicos en los que podría estar implicada de manera transversal, desde el ámbito médico hasta el educativo (26).

Un sistema de IA necesita una vasta cantidad de datos para una interpretación precisa. Los datos deben ser abundantes y de alta calidad para que el sistema pueda aprender de ellos y para que los expertos forenses puedan entrenarlo en diversas áreas fundamentales de la medicina forense. De esta manera, la IA puede interpretar los hallazgos en el examen post mortem y proporcionar una opinión sólida. Los expertos en medicina forense deben primero anotar manualmente imágenes y documentos con hallazgos clave, conclusiones y otros detalles en las máquinas. Esto implica que, inicialmente, los expertos forenses deben realizar un esfuerzo considerable.

La IA es simplemente una herramienta automatizada. No puede sustituir la interacción y la experiencia humana. Cada dato que se ingrese en el sistema requerirá esfuerzo humano. Por lo tanto, al principio, los expertos forenses tendrán que hacer un gran esfuerzo para entrenar el sistema y también será esencial la actualización periódica de los datos (27,28).

4.7 Futuras tendencias y avances en la aplicación de la realidad virtual en la escena del crimen.

La fusión de la tecnología de VR y los algoritmos de IA puede mejorar significativamente la precisión en la reconstrucción de escenas delictivas. La IA juega un papel crucial en el ámbito judicial. Los

algoritmos mejorados permiten el análisis de los datos recogidos, que pueden ser de diversas formas, como imágenes, vídeos y testimonios de testigos, con el objetivo de descubrir patrones y relaciones ocultas que podrían pasar desapercibidas para los investigadores humanos. El uso de esta capacidad de análisis puede ayudar a los investigadores a reconstruir la secuencia de eventos y a identificar a los sospechosos más probables de manera más eficiente (29).

La autopsia virtual potenciada con IA, una innovación reciente en medicina forense, representa un cambio de paradigma en la realización de autopsias. A diferencia de los métodos convencionales, esta técnica permite que las herramientas de aprendizaje automático procesen imágenes obtenidas mediante tomografía computarizada o resonancia magnética para identificar condiciones patológicas. Este enfoque se alinea con investigaciones anteriores que han resaltado la precisión y la rapidez de la IA para analizar grandes conjuntos de datos y extraer conclusiones sobre el estado patológico de los órganos, determinando así la causa de la muerte. Además, la capacidad de la IA para comparar las dimensiones de lesiones con patrones de diferentes armas ofrece una ventaja significativa en la identificación de armas utilizadas, algo que estudios previos también han explorado (30,31).

La futura investigación forense se enfocará en el análisis multiómico combinado y la modelización de algoritmos de IA. El proceso y el mecanismo regulador de enfermedades complejas pueden ser reflejados de manera más completa y sistemática mediante el análisis conjunto de múltiples ómicas utilizando máquinas habilitadas para IA.

En el contexto ecuatoriano, la incorporación de tecnologías emergentes como la realidad aumentada (AR), la realidad mixta (MR), las cámaras esféricas y los sistemas de aeronaves pilotadas remotamente (RPAS) es fundamental para avanzar en las ciencias forenses. Esto refleja una tendencia hacia la adopción de herramientas que mejoren la precisión y eficacia en el trabajo forense, proporcionando a los expertos forenses las capacidades necesarias para realizar un análisis más detallado y preciso (5,10).

5. Conclusión

La tecnología avanzada, como la realidad virtual, fotogrametría, escaneo láser y sensores LiDAR, ha revolucionado la reconstrucción de escenas del crimen, permitiendo la creación de modelos

3D de alta precisión que facilitan la visualización detallada y el análisis de pruebas. La IA se destaca como una herramienta clave en este proceso, al procesar grandes volúmenes de datos y detectar patrones que ayudan a la reconstrucción de escenas y predicción de comportamientos delictivos. Además, la realidad virtual no solo mejora la investigación forense, sino que también es crucial en la capacitación de peritos y estudiantes de medicina forense, proporcionando simulaciones prácticas que optimizan su formación.

6. Agradecimiento

Agradecemos cordialmente a la Facultad de Salud Pública de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por siempre apoyarnos en el desarrollo de nuestros conocimientos.

7. Conflicto de intereses

Los autores declaran que no tienen conflicto de intereses en la realización del presente trabajo.

8. Limitación de responsabilidad

Los autores manifiestan que todos los puntos de vista expresados en la presente investigación son su responsabilidad y no de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

9. Fuentes de apoyo

No contó con apoyo externo, esta revisión fue autofinanciada por los autores.

10. Referencias bibliográficas

- Hamad A, Jia B. How Virtual Reality Technology Has Changed Our Lives: An Overview of the Current and Potential Applications and Limitations. *Int J Environ Res Public Health* [Internet]. 2022 Sep 1 [cited 2024 Feb 3];19(18). Available from: /pmc/articles/PMC9517547/
- Guan H, Xu Y, Zhao D. Application of Virtual Reality Technology in Clinical Practice, Teaching, and Research in Complementary and Alternative Medicine. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 2022 Aug 11;2022:1–12.
- Kouijzer MMTE, Kip H, Bouman YHA, Kelders SM. Implementation of virtual reality in healthcare: a scoping review on the implementation process of virtual reality in various healthcare settings. *Implement Sci Commun*. 2023 Jun 16;4(1):67.
- Rodríguez Jiménez KR. Reconstrucción virtual como técnica de recreación en una escena del delito en las investigaciones criminalística en Panamá. Universidad UMECIT; 2021.
- abash-Pérez FT, Sandoval A. La realidad virtual (RV) es una opción innovadora. *Revista Innovaciones Educativas*. 2021;23(0).
- Sandoval-Poveda AM, Tabash-Pérez F, Sandoval-Poveda AM, Tabash-Pérez F. Realidad virtual como apoyo innovador en la educación a distancia. *Revista Innovaciones Educativas* [Internet]. 2021 Oct 29 [cited 2024 Jan 21];23(SPE1):120–32. Available from: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-41322021000300120&lng=en&nrm=iso&tlng=es
- Maneli MA, Isafiade OE. 3D Forensic Crime Scene Reconstruction involving Immersive Technology: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*. 2022;10:88821–57.
- Villa C, Lynnerup N, Jacobsen C. A Virtual, 3D Multimodal Approach to Victim and Crime Scene Reconstruction. *Diagnostics* [Internet]. 2023 Sep 1 [cited 2023 Dec 13];13(17). Available from: /pmc/articles/PMC10486680/
- Shenoy SU, Nagar V. Artificial Intelligence-Based Techniques for Crime Scene Re-construction and Investigation: An Overview. *Journal of Forensic Research*. 2023;14(4).
- Chango XA. Tecnologías Forenses en 360°. *Revista de Investigación en Seguridad Ciudadana y Orden Público*. 22AD;4:86–95.
- Quiñones V. UNESCO. 2023. Explorando el impacto de la realidad virtual y aumentada en los tribunales.
- Sieberth T, Dobay A, Affolter R, Ebert LC. Applying virtual reality in forensics – a virtual scene walkthrough. *Forensic Sci Med Pathol*. 2019 Mar 1;15(1):41–7.
- Sieberth T, Dobay A, Affolter R, Ebert L. A toolbox for the rapid prototyping of crime

- scene reconstructions in virtual reality. *Forensic Sci Int.* 2019 Dec;305:110006.
14. Kovaleva A, Frolova E, Demidchenko Y. Application of Leading and Innovative 3D Technologies for Crime Investigation. *Advances in Social Science, Education and Humanities Research.* 2020 May 27;441.
 15. Massini F, Ebert L, Ampanozi G, Franckenberg S, Benz L, Sieberth T. Comparison of superficial wound documentation using 2D forensic photography, 3D photogrammetry, Botscan® and VR with real-life examination. *Forensic Sci Med Pathol.* 2021 Sep 1;17(3):422–30.
 16. MACCHI LN. RECONSTRUCCIÓN VIRTUAL FORENSE [Criminalística]. [Mar del Plata]: Universidad Fasta; 2020.
 17. Rusman G, Popova E. Development of the Software for Examination of the Crime Scene by Using Virtual Reality, Based on Spherical Panoramic Shot and 3D-Scanning. In: 2020 Global Smart Industry Conference (GloSIC). IEEE; 2020. p. 297–302.
 18. Thiruchelvam V, Juremi J, Jegatheswaran R, Puat HAM. Crime Scene Reconstruction Based on a Suitable Software: A Comparison Study. *Journal of Engineering Science and Technology [Internet].* 2022 Dec 1 [cited 2023 Dec 28];17:266–83. Available from: <https://papers.ssrn.com/abstract=3990654>
 19. Meshal Albeedan, Hoshang Kolivanda, Ramy Hammady, Tanzila Saba. Seamless Crime Scene Reconstruction in Mixed Reality for Investigation Training: A Design and Evaluation Study. *IEEE Transactions on Learning Technologies [Internet].* 2023 [cited 2023 Dec 30];1–19. Available from: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10329468/>
 20. Prajapati S, Madrigal E, Friedman MT. Acquisition, Visualization and Potential Applications of 3D Data in Anatomic Pathology. *Discoveries (Craiova) [Internet].* 2016 Dec 31 [cited 2024 Feb 3];4(4):e68. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32309587/>
 21. Mindiola M. APLICACIÓN DE REALIDAD VIRTUAL PARA LA DESCRIPCIÓN DEL PROCESO AUTOMATIZADO DE PRODUCCIÓN DE BIOETANOL A BASE DE MAÍZ. [Pamplona]: UNIVERSIDAD DE PAMPLONA; 2021.
 22. Mayne R, Green H. Virtual reality for teaching and learning in crime scene investigation. *Science & Justice.* 2020 Sep;60(5):466–72.
 23. Kummer N, Delémont O, Voisard R, Weyermann C. The potential of digital technologies in problem-based forensic learning activities. *Science & Justice.* 2022 Nov;62(6):740–8.
 24. Sieberth T, Seckiner D, Dobay A, Dobler E, Golomingi R, Ebert L. The forensic holodeck – Recommendations after 8 years of experience for additional equipment to document VR applications. *Forensic Sci Int.* 2021 Dec 1;329:111092.
 25. Elhaw AE, Alshehhi DJ. Using Virtual Reality in (Investigating-Simulating-Reconstructing) the Crime Scene. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering [Internet].* 2023 Nov 24 [cited 2023 Dec 29];12(5s):530–55. Available from: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3962>
 26. Sánchez-Cabrero R, Novillo-López M, Arigita-García A, Costa-Román Ó, Pericacho-Gómez F. Carencias y limitaciones que afectan al asentamiento de la realidad virtual como tecnología de referencia en la sociedad actual. *Revista Espacios.* 2019;40(10):11.
 27. Wankhade TD, Ingale SW, Mohite PM, Bankar NJ. Artificial Intelligence in Forensic Medicine and Toxicology: The Future of Forensic Medicine. *Cureus [Internet].* 2022 Aug 25 [cited 2023 Dec 30];14(8). Available from: [/pmc/articles/PMC9506671/](https://pmc/articles/PMC9506671/)
 28. Asdrúbal G. LA AUDITORÍA FORENSE COMO FUNDAMENTO METODOLÓGICO EN LA DETECCIÓN DE CASOS DE FRAUDES INFORMÁTICOS. *Gestion ID.* 2021;6(2):315–51.
 29. Sieberth T, Dobay A, Affolter R, Ebert LC. Applying virtual reality in forensics – a virtual scene walkthrough. *Forensic Sci Med Pathol.* 2019 Mar 6;15(1):41–7.
 30. Cardenal NM. Aprendiendo de las autopsias. *MPG Journal [Internet].* 2020 Feb 7 [cited 2024 Jan 21];3(48):48. Available from: <https://mpgjournal.mpg.es/index.php/journal/article/view/379>
 31. Barcat JA. Autopsias: Los comienzos antes del fin. *MENICINA, BUENOS AIRES.* 2023;83:333–3336.