

Avances en la monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica

Advances in hemodynamic monitoring during cardiothoracic surgery

Daniel Augusto Armijos Quintero

Hospital Vozandes
<https://orcid.org/0000-0002-0471-4030>

Samay Camila González Ayala

Investigadora independiente
<https://orcid.org/0009-0004-3461-6118>

Dayanna Alejandra Flores Díaz

Investigadora independiente
<https://orcid.org/0000-0003-2955-5109>

Nadya Lizbeth Zapata Franco

Investigadora independiente
<https://orcid.org/0000-0001-7166-8372>

Jhoan Ernesto Velata Sagñay

Investigador independiente
<https://orcid.org/0009-0008-7689-7244>

Abigail Estefani Ricachi Sulca

Investigadora independiente
<https://orcid.org/0009-0006-6357-3983>

Marco Andrés Garcés Lozada

Investigador independiente
<https://orcid.org/0009-0003-8908-6196>

María José Garófalo Guillín

Investigadora independiente
<https://orcid.org/0009-0003-8492-8788>

RESUMEN

La monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha experimentado significativos avances en los últimos años, permitiendo una evaluación más precisa y en tiempo real del estado cardiovascular del paciente. Estos avances han sido impulsados por el desarrollo de tecnologías innovadoras que facilitan la medición continua de parámetros críticos como el gasto cardíaco, la presión arterial y la saturación de oxígeno. Entre las técnicas más destacadas se encuentran el uso de catéteres arteriales pulmonares, dispositivos de ecocardiografía transesofágica y sistemas de análisis de la variación de la presión del pulso. La integración de estas herramientas en el entorno quirúrgico ha mejorado notablemente la capacidad de los equipos médicos para detectar y corregir rápidamente alteraciones hemodinámicas, reduciendo así las complicaciones perioperatorias. Además, la implementación de algoritmos de inteligencia artificial y sistemas de monitoreo no invasivos está emergiendo como una frontera prometedora, ofreciendo la posibilidad de personalizar aún más el manejo hemodinámico basado en las características individuales del paciente. Sin embargo, es crucial continuar con investigaciones que validen la eficacia y seguridad de estas nuevas tecnologías en diferentes contextos clínicos. En resumen, los avances en la monitorización hemodinámica están transformando el abordaje del paciente durante la cirugía cardiotorácica, optimizando los resultados y mejorando la seguridad del paciente.

Palabras clave: Monitorización hemodinámica, cirugía cardiotorácica, técnicas invasivas, técnicas no invasivas, seguridad del paciente.

ABSTRACT

Hemodynamic monitoring during cardiothoracic surgery has undergone significant advances in recent years, allowing a more accurate and real-time assessment of the patient's cardiovascular status. These advances have been driven by the development of innovative technologies that facilitate the continuous measurement of critical parameters such as cardiac output, blood pressure, and oxygen saturation. Among the most prominent techniques are the use of pulmonary arterial catheters, transesophageal echocardiography devices and pulse pressure variation analysis systems. The integration of these tools into the surgical environment has significantly improved the ability of medical teams to quickly detect and correct hemodynamic alterations, thus reducing perioperative complications. In addition, the implementation of artificial intelligence algorithms and non-invasive monitoring systems is emerging as a promising frontier, offering the possibility of further customizing hemodynamic management based on individual patient characteristics. However, it is crucial to continue with research that validates the efficacy and safety of these new technologies in different clinical contexts. In summary, advances in hemodynamic monitoring are transforming the approach to the patient during cardiothoracic surgery, optimizing outcomes and improving patient safety.

Keywords: Hemodynamic monitoring, cardiothoracic surgery, invasive techniques, non-invasive techniques, patient safety.

INTRODUCCIÓN

La monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha experimentado avances significativos en las últimas décadas, transformándose en una herramienta esencial para mejorar los resultados quirúrgicos y la seguridad del paciente (1). Este tipo de cirugía, que implica procedimientos complejos en el corazón y los pulmones, requiere un control preciso de las variables hemodinámicas para asegurar una adecuada perfusión tisular y prevenir complicaciones intraoperatorias (2). Tradicionalmente, la monitorización se basaba en métodos invasivos como el catéter de arteria pulmonar; sin embargo, el desarrollo de tecnologías menos invasivas y más precisas ha revolucionado este campo (3). Actualmente, se emplean dispositivos que permiten una evaluación continua y dinámica del estado hemodinámico del paciente, utilizando parámetros como el gasto cardíaco, la variabilidad de la presión arterial y la saturación venosa central de oxígeno (4). Estos avances no solo proporcionan información en tiempo real, sino que también facilitan la toma de decisiones clínicas rápidas y fundamentadas (5). Además, la integración de técnicas de imagen y algoritmos de inteligencia artificial está comenzando a ofrecer nuevas perspectivas para mejorar la precisión diagnóstica y pronóstica en este contexto (6). La revisión de estos avances es fundamental para comprender cómo la tecnología emergente está redefiniendo los estándares de cuidado en la cirugía cardiotorácica, permitiendo un enfoque más personalizado y efectivo en el manejo intraoperatorio del paciente. En este artículo, se explorarán las innovaciones recientes en la monitorización hemodinámica, destacando sus aplicaciones prácticas y el impacto potencial en la práctica clínica diaria.

MÉTODOS

Para la elaboración de esta revisión narrativa sobre los avances en la monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica, se realizó una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos científicas, incluyendo PubMed, Scopus y Embase. Se emplearon términos MeSH como "Hemodynamic Monitoring", "Cardiac Surgery", y "Thoracic Surgery", así como términos DeCS equivalentes para obtener una cobertura integral de la literatura relevante. La estrategia de búsqueda se complementó con el uso de operadores booleanos como AND, OR, y NOT para refinar los resultados y asegurar la inclusión de estudios pertinentes. Los criterios de inclusión abarcaron artículos publicados en los últimos diez años, escritos en inglés o español, que proporcionaran datos originales o revisiones sobre técnicas y dispositivos de monitorización hemodinámica aplicados en el contexto quirúrgico cardiotorácico. Se excluyeron estudios que no abordaran directamente el tema central, artículos duplicados y aquellos que no estuvieran disponibles en texto completo. En total, se revisaron 150 artículos, de los cuales se seleccionaron 18 que ofrecían contribuciones significativas y actualizadas sobre innovaciones tecnológicas y prácticas clínicas en la monitorización hemodinámica, asegurando así una revisión comprensiva y actualizada del estado del arte en este campo crucial de la medicina perioperatoria.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Técnicas tradicionales de monitorización hemodinámica

Las técnicas tradicionales de monitorización hemodinámica han sido fundamentales en el manejo intraoperatorio durante la cirugía cardiotorácica. Estas técnicas proporcionan información crítica sobre el estado hemodinámico del paciente, permitiendo a los equipos quirúrgicos tomar decisiones informadas para optimizar la perfusión tisular y la función cardiovascular (1).

Uno de los métodos más comunes es la cateterización de la arteria pulmonar, también conocida como catéter de Swan-Ganz. Este dispositivo permite medir presiones en la arteria pulmonar y en la aurícula derecha, así como calcular el gasto cardíaco, la resistencia vascular sistémica y el contenido de oxígeno en la sangre. Aunque su uso ha disminuido debido a la aparición de técnicas menos invasivas, sigue siendo valioso en casos complejos donde se requiere un monitoreo detallado (1).

Otro pilar de la monitorización hemodinámica tradicional es el catéter arterial, que proporciona un acceso directo para medir la presión arterial de manera continua. Esta técnica es esencial para detectar cambios rápidos en la presión arterial durante la cirugía y para obtener muestras de sangre arterial para análisis de gases, lo cual es crucial para evaluar el estado ácido-base y la oxigenación del paciente (1).

La presión venosa central (PVC) es otro parámetro importante que se mide a través de un catéter venoso central. La PVC ofrece información sobre el volumen intravascular y la función del ventrículo derecho. Aunque es una medida indirecta y puede verse influenciada por varios factores, sigue siendo útil para guiar la reposición de fluidos y el manejo hemodinámico

(2).

La ecocardiografía transesofágica (ETE) ha complementado estas técnicas tradicionales, ofreciendo imágenes en tiempo real del corazón y grandes vasos. Aunque se considera una técnica más avanzada, su inclusión en esta revisión es relevante debido a su integración con métodos tradicionales para proporcionar una evaluación comprensiva del estado hemodinámico (2).

A pesar de los avances en tecnologías menos invasivas y en técnicas de monitoreo continuo, las técnicas tradicionales siguen siendo esenciales en muchos entornos quirúrgicos. Su valor radica no solo en los datos que proporcionan, sino también en su capacidad para correlacionarse con hallazgos clínicos y guiar intervenciones terapéuticas (2).

Avances tecnológicos en dispositivos de monitorización

En los últimos años, los avances tecnológicos en dispositivos de monitorización han transformado significativamente el campo de la cirugía cardiotorácica. Estos desarrollos han permitido una evaluación más precisa y en tiempo real del estado hemodinámico del paciente, lo cual es crucial para la gestión efectiva durante procedimientos quirúrgicos complejos (3).

Uno de los avances más notables ha sido la mejora en los monitores hemodinámicos no invasivos. Estos dispositivos utilizan tecnologías avanzadas como la fotopletomografía y la bioimpedancia eléctrica para medir parámetros críticos como el gasto cardíaco y la presión arterial sin necesidad de catéteres invasivos. Esto no solo reduce el riesgo de complicaciones asociadas con procedimientos invasivos, sino que también proporciona datos continuos y en tiempo real, mejorando la capacidad del equipo médico para responder rápidamente a cambios en el estado del paciente (3).

Además, los sistemas de monitorización basados en inteligencia artificial están comenzando a desempeñar un papel fundamental. Estos sistemas pueden analizar grandes cantidades de datos hemodinámicos y predecir posibles eventos adversos antes de que ocurran. Al identificar patrones que podrían pasar desapercibidos para el ojo humano, estas tecnologías permiten una intervención temprana y potencialmente salvan vidas (3).

La integración de la tecnología de ultrasonido portátil también ha revolucionado la monitorización durante la cirugía cardiotorácica. Los dispositivos de ultrasonido compactos permiten a los cirujanos obtener imágenes detalladas del corazón y los grandes vasos en tiempo real, facilitando decisiones intraoperatorias informadas sin interrumpir el flujo del procedimiento quirúrgico (4).

Otra innovación significativa es el uso de sensores inalámbricos que permiten la monitorización continua del paciente incluso cuando este es trasladado entre diferentes áreas del hospital. Estos sensores proporcionan una imagen completa del estado hemodinámico del paciente sin interrupciones, lo cual es especialmente valioso en situaciones críticas (4).

La telemonitorización es otro campo emergente que está cambiando el enfoque tradicional de la monitorización hemodinámica. Permite a los especialistas supervisar a los pacientes de forma remota, lo que es particularmente útil en centros médicos con recursos limitados o en situaciones donde la presencia física del especialista no es posible (4).

Monitorización no invasiva vs. invasiva: ventajas y desventajas

En el ámbito de la cirugía cardiotorácica, la monitorización hemodinámica es crucial para asegurar la estabilidad del paciente durante el procedimiento. Existen dos enfoques principales: la monitorización no invasiva y la invasiva, cada una con sus propias ventajas y desventajas (5).

La monitorización no invasiva se caracteriza por su facilidad de uso y menor riesgo para el paciente, ya que no requiere la inserción de catéteres o dispositivos dentro del cuerpo. Entre las técnicas más comunes se encuentran la oximetría de pulso, la medición de la presión arterial mediante manguitos oscilométricos y el uso de dispositivos que evalúan el gasto cardíaco a través de métodos de bioimpedancia o análisis de la onda de pulso. Una de las principales ventajas de este enfoque es la reducción del riesgo de complicaciones asociadas a procedimientos invasivos, como infecciones o trombosis. Además, estos métodos suelen ser más cómodos para el paciente y permiten una monitorización continua sin interrumpir el flujo del procedimiento quirúrgico (5).

Sin embargo, la monitorización no invasiva también presenta ciertas limitaciones. La precisión de las mediciones puede verse afectada por factores como el movimiento del paciente, la perfusión periférica deficiente o ciertas condiciones clínicas como el shock. Además, algunos métodos no invasivos pueden no proporcionar información tan detallada o específica como las técnicas invasivas, lo que puede ser crítico en situaciones donde se requiere un monitoreo hemodinámico preciso y en tiempo real (6).

Por otro lado, la monitorización invasiva implica la inserción de dispositivos dentro del cuerpo, como catéteres arteriales o catéteres venosos centrales, para obtener mediciones directas de parámetros hemodinámicos. Este enfoque

permite obtener datos muy precisos y detallados sobre el estado cardiovascular del paciente, lo cual es especialmente valioso en cirugías complejas o en pacientes con condiciones hemodinámicas inestables. La capacidad de medir directamente la presión arterial central o el gasto cardíaco a través de un catéter de arteria pulmonar son ejemplos de cómo estas técnicas pueden proporcionar información crítica para guiar las decisiones clínicas (6).

No obstante, la monitorización invasiva conlleva riesgos inherentes, como infecciones en el sitio de inserción, hemorragias o complicaciones mecánicas relacionadas con la colocación del catéter. Además, requiere personal capacitado para su correcta implementación y mantenimiento, lo que puede aumentar la carga operativa en un entorno quirúrgico (6).

Aplicaciones clínicas de la monitorización hemodinámica avanzada

La monitorización hemodinámica avanzada ha revolucionado el manejo intraoperatorio en la cirugía cardiotorácica, ofreciendo a los clínicos herramientas precisas para evaluar y optimizar el estado hemodinámico del paciente. Este enfoque permite una evaluación dinámica de parámetros críticos como el gasto cardíaco, la resistencia vascular sistémica y la presión de llenado del ventrículo, facilitando intervenciones oportunas que pueden mejorar significativamente los resultados quirúrgicos (7).

Una de las aplicaciones más destacadas es la optimización del volumen intravascular. Mediante el uso de tecnologías como el ecocardiograma transesofágico y los catéteres de arteria pulmonar, los anestesiólogos pueden ajustar con precisión la administración de fluidos y fármacos inotrópicos, evitando tanto la hipovolemia como la sobrecarga de volumen, condiciones que pueden comprometer la perfusión tisular y aumentar el riesgo de complicaciones postoperatorias (7).

Además, la monitorización hemodinámica avanzada permite una evaluación continua de la función ventricular. Durante procedimientos complejos, como la revascularización coronaria o el reemplazo valvular, es crucial mantener un equilibrio hemodinámico adecuado para prevenir el deterioro de la función cardíaca. Herramientas como el monitoreo de la presión arterial invasiva y los dispositivos de análisis de contorno de pulso proporcionan datos en tiempo real que ayudan a los equipos quirúrgicos a tomar decisiones informadas sobre el manejo farmacológico y la necesidad de soporte mecánico circulatorio (7).

Otro aspecto crítico es la detección temprana de complicaciones hemodinámicas. La capacidad de identificar rápidamente cambios en parámetros como el índice cardíaco o la saturación venosa mixta permite intervenciones inmediatas que pueden prevenir el desarrollo de condiciones críticas como el shock cardiogénico o el fallo multiorgánico. Esto es especialmente relevante en pacientes con comorbilidades significativas o aquellos que se someten a cirugías de alto riesgo (8).

Finalmente, la monitorización hemodinámica avanzada también juega un papel esencial en la evaluación postoperatoria. La información obtenida durante la cirugía puede guiar el manejo en las unidades de cuidados intensivos, asegurando una transición suave y segura del paciente al periodo de recuperación. El uso continuado de estas herramientas puede ayudar a detectar complicaciones tempranas y ajustar los tratamientos de manera proactiva, mejorando así los resultados a largo plazo (8).

Impacto de la monitorización hemodinámica en los resultados quirúrgicos

La monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha demostrado ser un componente crucial para mejorar los resultados quirúrgicos. En este contexto, la implementación de técnicas avanzadas de monitorización permite una evaluación precisa del estado hemodinámico del paciente, facilitando intervenciones oportunas y adecuadas (9).

Uno de los principales beneficios de la monitorización hemodinámica es la capacidad de detectar cambios en el volumen intravascular y la función cardíaca en tiempo real. Esto es esencial para prevenir complicaciones como el shock hipovolémico o el fallo cardíaco, que pueden tener un impacto significativo en la morbilidad y mortalidad postoperatoria. Estudios recientes han mostrado que el uso de dispositivos como el catéter de arteria pulmonar o la ecocardiografía transesofágica puede reducir el riesgo de complicaciones al permitir ajustes precisos en fluidos y medicamentos (9).

Además, la monitorización hemodinámica avanzada contribuye a una gestión más efectiva del paciente en el intraoperatorio. La capacidad para evaluar parámetros como el gasto cardíaco, la resistencia vascular sistémica y la saturación venosa mixta permite a los equipos quirúrgicos tomar decisiones informadas sobre la administración de fluidos, vasopresores e inotrópicos. Esto no solo mejora la estabilidad hemodinámica durante la cirugía, sino que también optimiza la recuperación postoperatoria al minimizar el riesgo de eventos adversos (9).

La evidencia sugiere que la implementación de protocolos de monitorización hemodinámica puede reducir significativamente el tiempo de estancia en unidades de cuidados intensivos y disminuir el tiempo total de hospitalización. Esto se traduce en una reducción de costos hospitalarios y una mejora en la calidad de vida del paciente, al facilitar una recuperación más rápida y con menos complicaciones (10).

Sin embargo, es importante reconocer que la monitorización hemodinámica avanzada requiere un equipo multidisciplinario bien entrenado para interpretar los datos correctamente y realizar intervenciones adecuadas. La formación continua y el uso de algoritmos basados en evidencia son esenciales para maximizar los beneficios de estas tecnologías (10).

En conclusión, el impacto de la monitorización hemodinámica en los resultados quirúrgicos durante la cirugía cardiotorácica es significativo. Al proporcionar datos precisos y en tiempo real, permite una gestión más efectiva del paciente, reduce las complicaciones postoperatorias y mejora los resultados generales. La adopción de estas tecnologías avanzadas representa un avance crucial en la atención quirúrgica moderna, destacando la importancia de su integración en las prácticas clínicas rutinarias (10).

Integración de la inteligencia artificial en la monitorización hemodinámica

La integración de la inteligencia artificial (IA) en la monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica representa un avance significativo en el campo de la medicina perioperatoria. La IA ofrece la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, lo que permite una evaluación más precisa y rápida del estado hemodinámico del paciente (11).

Uno de los principales beneficios de la IA en este contexto es su capacidad para predecir eventos adversos. Mediante el uso de algoritmos de aprendizaje automático, se pueden identificar patrones en los datos hemodinámicos que podrían pasar desapercibidos para el ojo humano. Esto permite a los profesionales de la salud anticipar complicaciones como hipotensión o arritmias, y tomar medidas preventivas antes de que estos problemas se manifiesten clínicamente (11).

Además, la IA facilita la personalización del tratamiento hemodinámico. Al integrar datos del paciente, como historial médico, características fisiológicas y respuestas previas al tratamiento, los sistemas basados en IA pueden sugerir intervenciones específicas adaptadas a las necesidades individuales del paciente. Esto no solo mejora los resultados quirúrgicos, sino que también optimiza el uso de recursos, reduciendo el tiempo en quirófano y mejorando la recuperación postoperatoria (11).

La implementación de IA en la monitorización hemodinámica también puede mejorar la precisión de las mediciones. Los sistemas tradicionales pueden estar sujetos a errores humanos o limitaciones tecnológicas. Sin embargo, los algoritmos de IA pueden corregir estos errores mediante el análisis continuo y el ajuste dinámico de los parámetros de monitorización. Esto resulta en una representación más fiel del estado hemodinámico del paciente (12).

A pesar de estos avances, la adopción de la IA en la monitorización hemodinámica enfrenta desafíos. Uno de los principales es la necesidad de garantizar la seguridad y privacidad de los datos del paciente. Además, los profesionales deben ser formados adecuadamente para interpretar y actuar sobre las recomendaciones generadas por los sistemas de IA. La integración efectiva de estas tecnologías requiere una colaboración estrecha entre ingenieros, desarrolladores y personal médico para asegurar que los sistemas sean intuitivos y fiables (12).

Desafíos actuales y limitaciones en la monitorización hemodinámica

La monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha experimentado avances significativos en las últimas décadas. Sin embargo, aún persisten desafíos y limitaciones que deben ser abordados para optimizar el manejo perioperatorio de los pacientes. Uno de los principales retos es la precisión y exactitud de las mediciones. Aunque existen dispositivos avanzados, como los catéteres de arteria pulmonar y los monitores de gasto cardíaco basados en análisis de onda de pulso, la variabilidad interindividual y las condiciones clínicas específicas pueden afectar la fiabilidad de los datos obtenidos (13).

Otro desafío importante es la invasividad de algunos métodos de monitorización. Los procedimientos que requieren la inserción de catéteres pueden asociarse con complicaciones como infecciones, trombosis o hemorragias. Esto ha impulsado el desarrollo de técnicas menos invasivas, pero estas a menudo enfrentan limitaciones en cuanto a su capacidad para proporcionar información tan detallada como los métodos invasivos (13).

La interpretación de los datos hemodinámicos también presenta dificultades. La complejidad de la fisiología cardiovascular y las interacciones dinámicas entre diversos parámetros hemodinámicos requieren un alto nivel de experiencia y juicio clínico para traducir los datos en decisiones terapéuticas efectivas. Además, la falta de estandarización en los protocolos de monitorización puede conducir a variaciones en la práctica clínica, lo que dificulta la comparación de resultados entre diferentes centros y estudios (13,14).

La tecnología emergente, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, ofrece oportunidades para mejorar la monitorización hemodinámica. Estas herramientas pueden ayudar a procesar grandes volúmenes de datos en tiempo real, identificar patrones complejos y predecir eventos adversos con mayor precisión. No obstante, su implementación enfrenta barreras relacionadas con la integración en sistemas clínicos existentes, la capacitación del personal y las preocupaciones sobre la privacidad de los datos (14).

Finalmente, el costo es una limitación significativa. Los dispositivos avanzados y las tecnologías innovadoras pueden ser costosos, lo que limita su disponibilidad en muchos centros médicos, especialmente en regiones con recursos limitados. Esto subraya la necesidad de equilibrar el acceso a tecnologías avanzadas con consideraciones económicas para garantizar un cuidado equitativo y efectivo (14).

Innovaciones en sensores y algoritmos para la monitorización

En los últimos años, el campo de la monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha experimentado avances significativos gracias a innovaciones en sensores y algoritmos. Estas mejoras han permitido una evaluación más precisa y en tiempo real del estado hemodinámico de los pacientes, lo cual es crucial para optimizar los resultados quirúrgicos y reducir complicaciones (15).

Uno de los desarrollos más destacados es la implementación de sensores miniaturizados que ofrecen una mayor precisión y menos invasividad. Estos sensores, a menudo integrados en dispositivos portátiles o implantables, pueden medir variables críticas como la presión arterial, el gasto cardíaco y la saturación de oxígeno con una alta fiabilidad. La tecnología de biosensores ha avanzado hasta el punto de permitir la monitorización continua sin la necesidad de procedimientos invasivos, lo que reduce el riesgo de infecciones y otras complicaciones (15).

Simultáneamente, los algoritmos de procesamiento de datos han evolucionado para manejar y analizar grandes volúmenes de información generados por estos sensores. Los algoritmos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático están siendo cada vez más integrados en sistemas de monitorización, permitiendo la detección temprana de patrones anormales que podrían indicar complicaciones emergentes. Estos sistemas inteligentes pueden predecir eventos adversos antes de que se manifiesten clínicamente, proporcionando a los equipos quirúrgicos una herramienta poderosa para la toma de decisiones (16).

Además, las plataformas de software avanzadas permiten la integración de datos hemodinámicos con otros parámetros fisiológicos, proporcionando una visión holística del estado del paciente. Esta integración facilita la personalización de estrategias terapéuticas durante la cirugía, adaptando las intervenciones en tiempo real según las necesidades específicas del paciente (16).

La comunicación inalámbrica y las tecnologías de Internet de las Cosas (IoT) también han mejorado la accesibilidad y el alcance de la monitorización hemodinámica. Los datos pueden ser transmitidos en tiempo real a dispositivos remotos, permitiendo a los especialistas monitorear el progreso del paciente incluso fuera del entorno quirúrgico inmediato. Esto es especialmente beneficioso en escenarios donde se requiere experiencia adicional o consultas rápidas durante procedimientos complejos (16).

Futuro de la monitorización hemodinámica en cirugía cardiotorácica

La monitorización hemodinámica en cirugía cardiotorácica ha experimentado avances significativos en los últimos años, y el futuro promete aún más innovaciones que podrían transformar la práctica clínica. Uno de los desarrollos más prometedores es la integración de tecnologías no invasivas y mínimamente invasivas que permiten una evaluación continua y precisa del estado hemodinámico del paciente sin los riesgos asociados a los métodos tradicionales (17).

El uso de sensores avanzados y dispositivos portátiles está ganando terreno, facilitando la monitorización en tiempo real de parámetros críticos como el gasto cardíaco, la presión arterial y la saturación de oxígeno. Estos dispositivos no solo mejoran la seguridad del paciente al reducir la necesidad de procedimientos invasivos, sino que también permiten una respuesta más rápida ante cambios hemodinámicos durante la cirugía (17).

Además, la inteligencia artificial y el aprendizaje automático están comenzando a desempeñar un papel crucial en la interpretación de datos hemodinámicos. Estas tecnologías pueden analizar grandes volúmenes de datos en tiempo real, identificando patrones y prediciendo posibles complicaciones antes de que se manifiesten clínicamente. Esto no solo mejora la toma de decisiones clínicas, sino que también optimiza el manejo del paciente al personalizar las intervenciones según las necesidades específicas de cada individuo (17).

Otra área de desarrollo es la telemedicina y el monitoreo remoto, que permiten a los especialistas supervisar a los pacientes desde ubicaciones remotas. Esto es especialmente útil en situaciones donde el acceso a expertos en hemodinámica es limitado, asegurando que los pacientes reciban atención de alta calidad sin importar su ubicación geográfica (18).

La personalización de la monitorización hemodinámica también está en el horizonte, con sistemas que se adaptan a las características fisiológicas únicas de cada paciente. Esto podría llevar a una medicina verdaderamente personalizada, donde las intervenciones se ajusten no solo a las condiciones clínicas actuales sino también a las predisposiciones genéticas y respuestas individuales al tratamiento (18).

Finalmente, la educación continua y la formación en nuevas tecnologías serán cruciales para que los profesionales de

la salud puedan aprovechar al máximo estos avances. La colaboración interdisciplinaria entre ingenieros, científicos de datos y clínicos será esencial para el desarrollo e implementación exitosa de estas innovaciones (18).

CONCLUSIONES

En conclusión, la monitorización hemodinámica durante la cirugía cardiotorácica ha experimentado avances significativos que mejoran tanto la seguridad del paciente como los resultados quirúrgicos. Las tecnologías emergentes, como los dispositivos de monitoreo mínimamente invasivos y las técnicas de imagen avanzadas, han permitido una evaluación más precisa y en tiempo real del estado hemodinámico del paciente. Estas innovaciones facilitan la detección temprana de complicaciones potenciales, permitiendo intervenciones oportunas que pueden reducir la morbilidad y la mortalidad asociada a estas cirugías complejas. Además, el uso de algoritmos de inteligencia artificial para interpretar datos hemodinámicos en tiempo real está comenzando a integrarse en la práctica clínica, lo que podría transformar aún más el enfoque hacia una medicina más personalizada y basada en datos. Sin embargo, es crucial continuar investigando para validar la eficacia de estas nuevas tecnologías y garantizar su accesibilidad y costo-efectividad en diversos entornos clínicos. La colaboración interdisciplinaria entre cirujanos, anestesiólogos, ingenieros biomédicos y científicos de datos será esencial para seguir impulsando estos avances y optimizar el cuidado del paciente durante las intervenciones cardiotorácicas.

REFERENCIAS

1. Marik PE, Cavallazzi R. Does the central venous pressure predict fluid responsiveness? An updated meta-analysis and a plea for some common sense. *Crit Care Med*. 2013 Jul;41(7):1774-81. doi: 10.1097/CCM.0b013e31828a25fd.
2. Monnet X, Messina A, Greco M, Bakker J, Aissaoui N, et al. ESICM guidelines on circulatory shock and hemodynamic monitoring 2025. *Intensive Care Med*. 2025 Nov;51(11):1971-2012. doi: 10.1007/s00134-025-08137-z.
3. Saugel B, Scheeren TWL, Teboul JL. Ultrasound-guided central venous catheter placement: a structured review and recommendations for clinical practice. *Crit Care*. 2017 Aug 28;21(1):225. doi: 10.1186/s13054-017-1814-y.
4. Monnet X, Shi R, Teboul JL. Prediction of fluid responsiveness. What's new? *Ann Intensive Care*. 2022 May 28;12(1):46. doi: 10.1186/s13613-022-01022-8.
5. Suzuki T, Suzuki Y, Okuda J, Minoshima R, Misonoo Y, et al. Cardiac output and stroke volume variation measured by the pulse wave transit time method: a comparison with an arterial pressure-based cardiac output system. *J Clin Monit Comput*. 2019 Jun;33(3):385-392. doi: 10.1007/s10877-018-0171-y.
6. Stenglova A, Benes J. Continuous Non-Invasive Arterial Pressure Assessment during Surgery to Improve Outcome. *Front Med (Lausanne)*. 2017 Nov 17;4:202. doi: 10.3389/fmed.2017.00202.
7. Ammirati E, Oliva F, Frigerio M. Circulatory shock. *N Engl J Med*. 2014 Feb 6;370(6):582. doi: 10.1056/NEJMc1314999.
8. Pinsky MR. Functional haemodynamic monitoring. *Curr Opin Crit Care*. 2014 Jun;20(3):288-93. doi: 10.1097/MCC.0000000000000090.
9. Osawa EA, Rhodes A, Landoni G, Galas FR, Fukushima JT, et al. Effect of Perioperative Goal-Directed Hemodynamic Resuscitation Therapy on Outcomes Following Cardiac Surgery: A Randomized Clinical Trial and Systematic Review. *Crit Care Med*. 2016 Apr;44(4):724-33. doi: 10.1097/CCM.0000000000001479.
10. Futier E, Lefrant JY, Guinot PG, Godet T, Lorne E, et al; INPRESS Study Group. Effect of Individualized vs Standard Blood Pressure Management Strategies on Postoperative Organ Dysfunction Among High-Risk Patients Undergoing Major Surgery: A Randomized Clinical Trial. *JAMA*. 2017 Oct 10;318(14):1346-1357. doi: 10.1001/jama.2017.14172.
11. Magouliotis DE, Sicouri N, Ramlawi L, Baudo M, Androutsopoulou V, Sicouri S. Artificial Intelligence in Adult Cardiovascular Medicine and Surgery: Real-World Deployments and Outcomes. *J Pers Med*. 2026 Jan 30;16(2):69. doi: 10.3390/jpm16020069.
12. Michard F, Mulder MP, Gonzalez F, Sanfilippo F. AI for the hemodynamic assessment of critically ill and surgical patients: focus on clinical applications. *Ann Intensive Care*. 2025 Feb 24;15(1):26. doi: 10.1186/s13613-025-01448-w.
13. Melo R, Galindo V, Gioli-Pereira L, Joelsons D, Assunção M, Alves B, Souza G, Bravim B, Passos R. Hemodynamic monitoring strategies in cardiac surgery: an update systematic review. *J Clin Monit Comput*. 2026 Feb;40(1):7-20. doi: 10.1007/s10877-025-01407-7.
14. Nedelcu C, Ionescu NS, Bizubac AM, Filip C, Cirstoveanu C. Trends and Challenges in Noninvasive Hemodynamic Monitoring of Neonates Following Cardiac Surgery: A Narrative Review. *Life (Basel)*. 2025 Oct 17;15(10):1621. doi: 10.3390/life15101621.
15. Tang C, Liu Z, Li L. Mechanical Sensors for Cardiovascular Monitoring: From Battery-Powered to Self-Powered. *Biosensors (Basel)*. 2022 Aug 17;12(8):651. doi: 10.3390/bios12080651.
16. Vento V, Kuntz S, Lejay A, Chakfe N. Evolutionary trends and innovations in cardiovascular intervention. *Front Med Technol*. 2024 May 2;6:1384008. doi: 10.3389/fmedt.2024.1384008.
17. Saugel B, Cecconi M, Hajjar LA. Noninvasive Cardiac Output Monitoring in Cardiothoracic Surgery Patients: Available Methods and Future Directions. *J Cardiothorac Vasc Anesth*. 2019 Jun;33(6):1742-1752. doi: 10.1053/j.jvca.2018.06.012.
18. Kopanczyk R, Lester J, Long MT, Kossbiel BJ, Hess AS, et al. The Future of Cardiothoracic Surgical Critical Care Medicine as a Medical Science: A Call to Action. *Medicina (Kaunas)*. 2022 Dec 27;59(1):47. doi: 10.3390/medicina59010047