

Monitoreo hemodinámico en el paciente crítico y perioperatorio: actualización y nuevas herramientas disponibles

Hemodynamic Monitoring in Critically Ill and Perioperative Patients: An Update and Emerging Tools

Melissa Martínez-García^{1,a}, Erick Alfonso Jiménez-Zafra^{2,a}, German Eduardo Guarín-Aldana^{3,a}, Nury Carolina Ortega-Valenzuela^{4,a}, William David Coral-Yepes^{5,a}, Stefanya Geraldine Bermúdez-Moyano^{6,a}

¹ Clínica La Estancia, Servicio de Medicina Crítica y Cuidado Intensivo. Popayán, Colombia.

² Clínica Medicadiz, Servicio de Cirugía. Ibagué, Colombia.

³ Clínica Avidanti, Servicio de Medicina Crítica y Cuidado Intensivo. Ibagué, Colombia.

⁴ Fundación Hospital San Pedro, Servicio de Urgencias. Pasto, Colombia.

⁵ Fundación Hospital Universitario San José, Servicio de Urgencias. Popayán, Colombia.

⁶ Hospital Universitario del Valle, Servicio de Medicina Crítica y Cuidado Intensivo. Cali, Colombia.

^a Médico

Información del artículo

Citar como: Martínez-García M, Jiménez-Zafra EA, Guarín-Aldana GE, Ortega-Valenzuela NC, Coral-Yepes WD, Bermúdez-Moyano SG. Monitoreo hemodinámico en el paciente crítico y perioperatorio: actualización y nuevas herramientas disponibles. Health Care & Global Health. 2026;10(3):261-271.

DOI: 10.22258/hgh.v10i3.419

Autor de Correspondencia

Stefanya Geraldine Bermúdez-Moyano
Dirección: Hospital Universitario del Valle, Cali, Colombia.
Email: stephaniabz24@gmail.com
Teléfono: 3157889382

Historial del artículo

Recibido: 25 de marzo de 2026
Primera decisión editorial: 13 de abril de 2026
Versión revisada recibida: 29 de junio de 2026
Aceptado: 14 de agosto de 2026
Publicado en línea: 15 de septiembre de 2026

Proceso de revisión

Tipo de revisión: revisión editorial
Número de revisores externos: no aplica
Rondas de revisión: 1

Resumen

El monitoreo hemodinámico ha evolucionado desde una visión centrada en variables macrocirculatorias e invasivas hacia una aproximación más integral orientada a perfusión tisular, evaluación vascular no invasiva y predicción temprana del deterioro circulatorio. Esta revisión narrativa sintetiza la evidencia reciente sobre herramientas aplicables al paciente crítico y perioperatorio, con énfasis en la microcirculación, la monitorización continua de presión arterial sin línea invasiva y los modelos predictivos basados en inteligencia artificial. La literatura muestra que la alteración microvascular puede persistir pese a metas sistémicas aparentemente corregidas y aportar información pronóstica adicional. A su vez, las tecnologías cuffless y multimodales han ampliado las posibilidades de seguimiento continuo, aunque persisten limitaciones en calibración, precisión y reproducibilidad clínica. Los modelos predictivos han mejorado la detección anticipada de hipotensión intraoperatoria, pero su valor depende de integrarse a decisiones fisiológicamente dirigidas. En conjunto, estas herramientas redefinen el monitoreo hemodinámico como una estrategia multimodal, dinámica e individualizada.

Palabras clave: Monitoreo Hemodinámico; Microcirculación; Determinación de la Presión Arterial; Inteligencia Artificial; Monitoreo Intraoperatorio (Fuente: DeCS, BIREME).

Abstract

Hemodynamic monitoring has evolved from an approach centered on invasive macrocirculatory variables to a broader framework focused on tissue perfusion, noninvasive vascular assessment, and early prediction of circulatory deterioration. This narrative review summarizes recent evidence on tools applicable to critically ill and perioperative patients, with emphasis on microcirculatory monitoring, continuous noninvasive blood pressure assessment, and artificial intelligence based predictive models. Current literature shows that microvascular dysfunction may persist despite apparently corrected systemic targets and may provide additional prognostic information. At the same time, cuffless and multimodal technologies have expanded the possibilities for continuous monitoring, although important limitations remain regarding calibration, accuracy, and clinical reproducibility. Predictive models have improved the anticipation of intraoperative hypotension, but their usefulness still depends on integration with physiologically guided clinical decisions. Taken together, these advances support a transition from isolated parameter tracking to a multimodal, dynamic, and individualized hemodynamic monitoring strategy.

Keywords: Hemodynamic Monitoring; Microcirculation; Blood Pressure Determination; Artificial Intelligence; Monitoring, Intraoperative (Source: MeSH, NLM).



Introducción

El monitoreo hemodinámico constituye uno de los pilares del cuidado del paciente crítico y del paciente perioperatorio, porque permite integrar la información cardiovascular con la evaluación clínica de la perfusión y orientar intervenciones terapéuticas en tiempo real. Su verdadero valor no radica únicamente en registrar variables aisladas como la presión arterial o el gasto cardíaco, sino en interpretar si el aporte de oxígeno es suficiente para sostener la demanda tisular y si las medidas instauradas corrigen de manera efectiva la insuficiencia circulatoria. Esta visión es clínicamente relevante, ya que la reanimación guiada por objetivos hemodinámicos se ha vinculado con reducción de complicaciones posoperatorias, menor estancia hospitalaria y, en contextos seleccionados, menor carga de disfunción orgánica. En pacientes sometidos a cirugía mayor no cardíaca, las estrategias perioperatorias basadas en optimización hemodinámica han mostrado disminución de complicaciones globales, mientras que ensayos contemporáneos también han documentado beneficios sobre desenlaces como lesión renal aguda, edema pulmonar no cardiogénico e infección posoperatoria^{[1][2][3]}.

Pese a ello, el paradigma tradicional del monitoreo hemodinámico ha descansado durante décadas en variables macrocirculatorias y, con frecuencia, en dispositivos invasivos. El catéter de arteria pulmonar, el análisis invasivo de la onda de pulso y otras técnicas avanzadas han aportado información valiosa sobre precarga, gasto cardíaco y respuesta a fluidos, pero su adopción generalizada se ha visto limitada por el riesgo de complicaciones, la necesidad de entrenamiento especializado, el costo y una capacidad incompleta para representar la perfusión tisular real^{[4][5]}. Este problema se vuelve más evidente en estados como la sepsis y el shock distributivo, donde puede existir aparente normalización de variables globales mientras persisten alteraciones microcirculatorias y fracaso en la extracción celular de oxígeno. En ese escenario aparece la conocida disociación entre macrocirculación y microcirculación, que ayuda a explicar por qué alcanzar metas convencionales de presión arterial media, saturación venosa central o gasto cardíaco no siempre se traduce en restauración efectiva de la perfusión periférica ni en mejoría inmediata del metabolismo tisular^{[6][7]}.

Como respuesta a estas limitaciones, en los últimos años han emergido herramientas menos invasivas o no invasivas orientadas a caracterizar con mayor precisión la suficiencia circulatoria y anticipar el deterioro hemodinámico. Entre ellas se encuentran la evaluación de la microcirculación periférica mediante tiempo de relleno capilar, la espectroscopia de infrarrojo cercano para estimar oxigenación tisular, la monitorización

continua no invasiva de la presión arterial, las tecnologías de análisis avanzado de la onda de pulso y los índices funcionales que permiten estimar la respuesta a fluidos o al soporte vasopresor^{[8][9]}. De forma paralela, el desarrollo de modelos predictivos basados en inteligencia artificial y aprendizaje automático ha desplazado el foco desde la simple observación del estado hemodinámico actual hacia la identificación precoz de trayectorias de riesgo, en especial la predicción de hipotensión inminente. Algunos de estos modelos han alcanzado desempeños discriminativos altos en escenarios perioperatorios para hipotensión postinducción, y en ciertos estudios su incorporación a algoritmos preventivos ha reducido la frecuencia y duración de episodios hipotensivos intraoperatorios^{[10][11]}.

En este contexto, el monitoreo hemodinámico contemporáneo debe entenderse como una estrategia de apoyo para personalizar la reanimación, limitar intervenciones potencialmente nocivas y reconocer de forma más temprana la inestabilidad cardiovascular^{[4][8]}. El objetivo de esta revisión narrativa es describir los avances recientes en monitoreo hemodinámico del paciente crítico y perioperatorio, con énfasis en las nuevas herramientas para la evaluación de la perfusión tisular, la monitorización no invasiva de la presión arterial y los modelos predictivos basados en inteligencia artificial, así como sus potenciales aplicaciones y limitaciones en la práctica clínica.

Metodología

Se realizó una revisión narrativa de la literatura con el objetivo de sintetizar evidencia clínica y traslacional sobre las herramientas contemporáneas de monitoreo hemodinámico en el paciente crítico y perioperatorio, con énfasis en evaluación de la perfusión tisular, tecnologías no invasivas de presión arterial y modelos predictivos basados en inteligencia artificial.

Fuentes de información y estrategias de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en MEDLINE/PubMed, EMBASE, Cochrane Library, Web of Science, OVID, SciELO y ClinicalTrials.gov, incluyendo publicaciones en inglés y español. Se emplearon términos MeSH/DeCS y palabras clave libres combinados con operadores booleanos AND y OR. Entre los términos principales se incluyeron “Hemodynamic Monitoring”, “Microcirculation”, “Blood Pressure Determination”, “Artificial Intelligence”, “Monitoring, Intraoperative”, “tissue perfusion”, “cuffless blood pressure” y “hypotension prediction index”. La estrategia se complementó con revisión manual de referencias relevantes.

Criterios de selección y análisis

Se incluyeron revisiones, estudios observacionales, ensayos clínicos, investigaciones tecnológicas y estudios

experimentales que abordaran monitoreo hemodinámico, perfusión tisular, microcirculación, monitorización vascular no invasiva o modelos predictivos aplicados al entorno crítico y perioperatorio. Se excluyeron artículos duplicados, publicaciones sin texto completo y estudios con pertinencia temática limitada. La información se organizó en cuatro ejes: evolución conceptual del monitoreo hemodinámico, microcirculación y perfusión tisular, tecnologías no invasivas para evaluación vascular y presión arterial continua, e inteligencia artificial y modelos predictivos. La síntesis se desarrolló de forma narrativa, consignando las medidas de asociación y desempeño diagnóstico reportadas por los autores originales cuando estuvieron disponibles.

Resultados

Evolución del monitoreo hemodinámico en el paciente crítico y perioperatorio

La trayectoria del monitoreo hemodinámico en el paciente crítico y perioperatorio ha transitado desde un enfoque centrado casi exclusivamente en presión arterial, frecuencia cardíaca y variables macrocirculatorias, hacia una valoración más amplia del estado circulatorio, en la que importan tanto el flujo como la perfusión tisular y la respuesta a las intervenciones. Bouchez *et al.* describen que esta evolución comenzó con la consolidación histórica de la medición no invasiva de la presión arterial y progresó hacia plataformas que hoy agrupan tecnologías orientadas a presión, flujo, oxigenación tisular y ultrasonido, lo que refleja un cambio conceptual: ya no basta con cuantificar presión, sino que se requiere interpretar cómo esa presión se traduce en entrega de oxígeno y perfusión orgánica^[12]. En el entorno perioperatorio, Quintão *et al.* señalan que durante las últimas cinco décadas el monitoreo hemodinámico ha pasado de métodos invasivos a dispositivos mínimamente invasivos y no invasivos, integrando pruebas dinámicas de respuesta a fluidos, gasto cardíaco, volumen sistólico, marcadores de oxigenación tisular y ecocardiografía dentro de un enfoque multimodal. Esta transición no ha sido meramente tecnológica; ha respondido a una necesidad clínica concreta: reconocer de forma más temprana la inestabilidad cardiovascular y ajustar el tratamiento con mayor precisión^[13].

El modelo clásico se apoyó en herramientas invasivas como el catéter arterial, el catéter de arteria pulmonar y, más adelante, la termodilución transpulmonar, especialmente en cirugía de alto riesgo y en estados de choque complejos. Estas tecnologías aportaron mediciones continuas y una caracterización hemodinámica más estable, pero a costa de mayor invasividad, necesidad de entrenamiento y riesgo de complicaciones. Bouchez *et al.* destacan que el catéter arterial continúa siendo el estándar de referencia para

la monitorización invasiva de la presión arterial por su precisión y por permitir muestreo seriado, aunque su uso no está exento de sangrado, infección, trombosis o lesión nerviosa^[12]. En paralelo, Pinsky *et al.* recuerdan que una mayor invasividad suele ofrecer una visualización más granular del estado cardiovascular, pero también incrementa costos, artefactos y complejidad interpretativa; por eso, el beneficio clínico no depende del dispositivo aislado, sino de que la información obtenida conduzca a una intervención eficaz^[14]. Esta idea es consistente con las guías alemanas de Saugel *et al.*, que reservan la presión arterial continua invasiva para pacientes con riesgo elevado de inestabilidad o complicaciones relacionadas con hipotensión o hipertensión, y reconocen que los sistemas continuos no invasivos aún no son intercambiables con la medición intraarterial^[15].

El siguiente cambio relevante fue abandonar la dependencia de marcadores estáticos de precarga y adoptar una interpretación funcional de la hemodinámica. En este punto, el interés dejó de centrarse en “cuánto volumen tiene el paciente” para pasar a preguntarse “qué ocurrirá si administro fluidos o modifico el tono vascular”. Pinsky *et al.* sintetizan bien este viraje al mostrar que las variables dinámicas para predecir respuesta a fluidos permiten limitar la administración en pacientes no respondedores y reducir exposición innecesaria a vasopresores, mientras que la optimización perioperatoria guiada por objetivos mostró reducción de complicaciones en metaanálisis actualizados, con un riesgo relativo de 0,77 (IC 95%: 0,71–0,83). En esa misma línea, el ensayo OPTIMISE no alcanzó significación estadística para su desenlace compuesto, aunque mostró una reducción absoluta del riesgo de 6,8% (IC 95%: –0,3 a 13,9; $p=0,07$), y el estudio FEDORA encontró menor tasa de complicaciones posoperatorias con algoritmos que integraban presión arterial media y gasto cardíaco^[14]. Las guías de la Sociedad Europea de Medicina Intensiva (ESICM) 2025 consolidan esta evolución conceptual al recomendar variables dinámicas por encima de marcadores estáticos de precarga cuando sean aplicables, proponer la prueba de elevación pasiva de piernas en pacientes ventilados y señalar que el gasto cardíaco o el volumen sistólico deben monitorizarse cuando el paciente no responde a la terapia inicial. El monitoreo, entonces, deja de ser descriptivo y se convierte en una herramienta para probar hipótesis fisiológicas al lado de la cama^[16].

Más recientemente, la evolución del campo ha incorporado la perfusión periférica, la microcirculación, la oxigenación tisular y la predicción de eventos futuros. Las guías ESICM 2025 comparadas con el consenso de 2014 muestran con claridad este desplazamiento: ahora se propone vigilar perfusión cutánea mediante tiempo de relleno capilar, temperatura y moteado, complementar la valoración con saturación venosa central de oxígeno y diferencia

venoarterial de dióxido de carbono, e incluso considerar la evaluación de la microcirculación como adjunto a la valoración hemodinámica integral. Bouchez *et al.* añaden que la espectroscopia de infrarrojo cercano permite una estimación no invasiva de la oxigenación tisular y que, combinada con pruebas dinámicas como la prueba de oclusión vascular (VOT), puede explorar reactividad microvascular, aunque sigue siendo más útil como monitor de tendencia que como valor absoluto y sus dispositivos no son intercambiables^[16]. Visto en conjunto, el monitoreo hemodinámico moderno ha dejado de ser un inventario de números para convertirse en una lectura fisiológica escalonada, multimodal y cada vez más orientada a anticiparse al daño antes de que este se exprese clínicamente.

Monitoreo de la microcirculación y perfusión tisular

El monitoreo de la microcirculación y la perfusión tisular surge de una observación clínica decisiva: la normalización de la presión arterial, del gasto cardíaco o de otros parámetros macrocirculatorios no garantiza que el oxígeno llegue de manera efectiva al lecho capilar ni que la célula recupere su función metabólica. En sepsis, choque y cirugía mayor, esta pérdida de coherencia hemodinámica explica por qué algunos pacientes persisten con hipoperfusión, hiperlactatemia o disfunción orgánica pese a aparentes metas sistémicas alcanzadas. En este contexto, la videomicroscopía sublingual, la espectroscopia de infrarrojo cercano (NIRS) y el VOT han permitido trasladar la evaluación de la perfusión desde el plano conceptual al escenario clínico real, haciendo posible detectar densidad capilar funcional reducida, heterogeneidad del flujo y falla de reactividad microvascular, hallazgos que no solo describen enfermedad, sino que también aportan información pronóstica y, de manera creciente, terapéutica^[17].

De Backer *et al.* sintetizan de forma clara el fundamento fisiopatológico de este campo al mostrar que, en sepsis, la alteración microvascular se caracteriza por disminución de la densidad vascular, reducción de la proporción de capilares perfundidos y marcada heterogeneidad entre territorios contiguos, incluso cuando la presión arterial y el gasto cardíaco ya han sido corregidos. Se destaca la magnitud de estas alteraciones, las cuales se asocian con peor pronóstico, y que los no sobrevivientes presentan menor proporción y densidad de capilares perfundidos y mayor heterogeneidad del flujo que los sobrevivientes, mientras la velocidad de los eritrocitos en los vasos aún perfundidos no necesariamente cambia, lo que sugiere que en este nivel predomina más el componente difusivo del transporte de oxígeno que el puramente convectivo. La mejoría temporal de la microcirculación acompaña a los pacientes que responden a la reanimación global, en contraste con quienes mantienen deterioro microvascular progresivo, reforzando la idea de que la microcirculación no es un epifenómeno, sino un determinante funcional del curso clínico^[17].

Cho *et al.* trasladaron esta lógica a un escenario perioperatorio mediante un estudio observacional prospectivo en cirugía cardíaca con circulación extracorpórea (CPB), en el que 109 pacientes completaron la evaluación seriada con NIRS y VOT para determinar si la reactividad microvascular intraoperatoria podía anticipar eventos adversos mayores (MAE). La incidencia de MAE fue de 29,4%, y la pendiente de recuperación del VOT durante la CPB mostró capacidad predictiva moderada para este desenlace, con un área bajo la curva ROC de 0,701 (IC 95%: 0,606–0,785; $p < 0,001$). Un punto de corte $< 1,08\%/s$ identificó pacientes con riesgo aumentado de MAE con sensibilidad de 62,5% y especificidad de 72,7%; a la vez, el grupo con peor reactividad presentó mayor frecuencia de lesión renal aguda, más MAE globales y peor perfil de gravedad posoperatoria. Esto demuestra que el valor no radica solo en proponer un predictor temprano, sino en mostrar que la agresión microvascular inducida por la CPB puede ser clínicamente visible antes de que aparezca la complicación manifiesta, lo que abre la posibilidad de una vigilancia intraoperatoria orientada a perfusión y no únicamente a presión^[18].

Domizi *et al.* exploraron después si esta información microcirculatoria podía modificarse con una intervención clínica concreta. En un estudio prospectivo observacional de 50 pacientes con sepsis o choque séptico febril tratados con acetaminofén (ACT), evaluaron la microcirculación sublingual mediante imagen de campo oscuro incidente y la perfusión muscular periférica con NIRS y VOT antes de la infusión, a los 30 minutos y a las 2 horas. Observaron a los 30 minutos un incremento significativo en la densidad de vasos perfundidos pequeños y totales, mejoría del índice de flujo microvascular (MFI), reducción de la heterogeneidad del flujo y aceleración de la curva de reperusión tras el VOT, compatible con mayor reactividad microvascular. Aunque no encontraron una correlación nítida con la hemoglobina libre plasmática, el trabajo sugiere que el ACT podría ejercer un efecto favorable sobre el endotelio y la perfusión capilar más allá de su acción antipirética. La lectura crítica aquí es obligada: al tratarse de un estudio observacional, sin grupo control y con variabilidad basal importante, estos hallazgos deben entenderse como señal biológica prometedora y no como prueba definitiva de beneficio terapéutico^[19].

Dyminski Parente Ribeiro *et al.* aportan una pieza distinta pero muy valiosa en esta evolución, al desarrollar un modelo murino mínimamente invasivo de videomicroscopía sublingual con técnica de campo oscuro lateral (SDF) para medir perfusión y vasomoción durante endotoxemia inducida por lipopolisacárido (LPS). En este estudio preclínico, los animales expuestos a LPS mostraron a los 90 minutos una disminución significativa de la proporción de vasos perfundidos y del MFI frente a controles, mientras que la vasomoción de muy baja frecuencia se conservó durante la endotoxemia,

sugiriendo una respuesta activa del tono microvascular ante el estrés inflamatorio. El mérito principal de este estudio busca ofrecer una plataforma translacional que aproxima el laboratorio a la cabecera del paciente: emplea una tecnología ya consolidada en humanos, evita la invasividad de la microscopía intravital clásica y permite estudiar de forma dinámica cómo aparecen precozmente los déficits de perfusión antes de que la falla orgánica sea evidente^[20].

Shao *et al.* se movieron un paso más allá del monitoreo y exploraron, en un modelo experimental en pabellón auricular de ratón, la posibilidad de intervenir de manera directa la hipoperfusión microvascular mediante pinzas ópticas. Su sistema logró redirigir eritrocitos hacia ramas con flujo insuficiente, con una mejoría media de la reperusión del 588% en cinco microvasos de bajo flujo y aumentos máximos de hasta 1900% en algunos trayectos; el efecto fue dependiente de la localización del láser y de la potencia aplicada, con mejor desempeño dentro de un rango de 200 a 550 mW, mientras potencias superiores podían atrapar eritrocitos en la entrada del vaso y agravar la obstrucción. Aunque esta estrategia no pertenece todavía al arsenal clínico del monitoreo hemodinámico, su valor conceptual es notable: demuestra que la hipoperfusión microvascular puede manipularse de forma precisa a nivel de rama vascular, algo que las estrategias macrocirculatorias tradicionales no consiguen. Desde la perspectiva de una revisión narrativa, este estudio funciona mejor como evidencia de frontera tecnológica que como herramienta aplicable hoy al paciente crítico^[21].

Wang *et al.* integraron finalmente la evaluación microcirculatoria con monitoreo neurofisiológico en una cohorte prospectiva de 200 pacientes neurocríticos con sepsis, con el objetivo de predecir encefalopatía asociada a sepsis (SAE) y desenlaces posteriores. El 67% desarrolló SAE, y estos pacientes presentaron valores significativamente menores de densidad de vasos perfundidos (PVD: $8,2 \pm 2,1$ frente a $12,4 \pm 2,8$ mm/mm²; $p < 0,001$) y de MFI ($1,8 \pm 0,6$ frente a $2,6 \pm 0,4$; $p < 0,001$) que quienes no desarrollaron SAE. La combinación de parámetros microcirculatorios con hallazgos de electroencefalografía continua (cEEG) alcanzó un área bajo la curva de 0,92 (IC 95%: 0,88–0,96) para predecir SAE y se asoció con mortalidad a 28 días mediante una razón de riesgo de 3,45 (IC 95%: 2,12–5,61; $p < 0,001$), junto con peor evolución neurológica a 90 días^[22]. Lo anterior sitúa a la microcirculación como marcador temprano de lesión orgánica específica, no solo como descriptor global del choque. Aun así, por tratarse de una cohorte de un solo entorno clínico, su aplicabilidad externa requiere validación adicional antes de extrapolar el modelo a otros subgrupos de sepsis.

Tecnologías no invasivas para evaluación vascular y presión arterial continua

El desarrollo de tecnologías no invasivas para evaluación vascular y monitorización continua de la presión arterial responde a una necesidad clínica concreta: obtener información hemodinámica frecuente o latido a latido sin exponer al paciente a los riesgos del acceso arterial y sin depender de mediciones intermitentes que pueden pasar por alto cambios transitorios, pero clínicamente relevantes. En este escenario han convergido varias rutas tecnológicas, entre ellas los sistemas basados en fotopletimografía, análisis de morfología de la onda de pulso, tiempo de tránsito del pulso, bioimpedancia, tonometría, volumen de pinzamiento digital y, más recientemente, sensores acústicos intraauriculares y modelos de aprendizaje automático. La dirección del campo ya no está dada solo por la comodidad del dispositivo, sino por su capacidad para conservar validez fisiológica, mantener estabilidad frente a artefactos, reducir la dependencia de calibraciones frecuentes y demostrar precisión suficiente en condiciones dinámicas, no únicamente en reposo. Esa transición obliga a interpretar la evidencia con un criterio doble: qué tan prometedora es la innovación y qué tan cerca está de ser clínicamente confiable^{[23][24]}.

Henry *et al.* sitúan el marco general de esta discusión al mostrar que la medición cuffless de la presión arterial ha dejado de ser una curiosidad tecnológica para convertirse en un ecosistema heterogéneo de soluciones basadas en Fotopletimografía (PPG), tonometría, electrocardiografía, procesamiento remoto por imagen, presión digital oscilométrica y otras aproximaciones híbridas, integradas incluso en teléfonos inteligentes y relojes. Su revisión subraya que el principal cuello de botella ya no es la capacidad de captar una señal biológica, sino traducirla de manera confiable a valores de presión arterial útiles en la práctica. Por eso, el procesamiento de señal, la mitigación de artefactos, la estandarización de protocolos y la validación frente a referencias adecuadas ocupan un lugar central. El mismo trabajo remarca que los dispositivos cuffless no miden presión arterial en mmHg de forma directa, sino que la estiman a partir de variables fisiológicas derivadas, lo que vuelve más compleja su validación que la de los dispositivos con manguito; en ese contexto, las normas del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) publicadas desde 2014 y la norma ISO 81060-3 de 2022 representan pasos regulatorios relevantes, aunque todavía insuficientes para resolver la heterogeneidad tecnológica y clínica actual^[23].

Yang *et al.* profundizan esa misma preocupación desde una perspectiva clínica internacional y muestran que el atractivo de estos dispositivos para pacientes y médicos, por comodidad, portabilidad y posibilidad de monitorización prolongada, contrasta con vacíos todavía importantes en exactitud, calibración, equidad y despliegue clínico. La revisión destaca que la mayoría de

dispositivos actualmente disponibles se basan en análisis de la onda de pulso (PWA) derivada de PPG, con o sin electrocardiografía, y requieren calibración individual con medición convencional por manguito; en consecuencia, muchos de ellos siguen mejor los cambios relativos respecto al punto calibrado que la presión arterial absoluta. También se señala que tecnologías emergentes como presión digital oscilométrica y ultrasonido podrían reducir la dependencia de calibración, aunque su validez aún no está firmemente establecida. Un hallazgo particularmente relevante para la práctica es que la autocalibración puede introducir errores clínicamente significativos: en un estudio citado por los autores, la calibración realizada por los propios participantes generó fluctuaciones de hasta 10 mmHg en la presión sistólica de sujetos hipertensos, lo que ilustra que la facilidad de uso no garantiza fiabilidad diagnóstica ni seguridad terapéutica^[24].

Chandrasekhar *et al.* aportan una observación metodológica decisiva para cualquier tecnología basada en PPG: la presión de contacto del sensor modifica de forma sustancial la señal y puede distorsionar la estimación de presión arterial incluso en ausencia de cambios hemodinámicos reales. En 17 sujetos sanos, al variar progresivamente la presión de contacto del sensor sobre un rango fisiológico, la desviación máxima del PAT detectado en el pie y en el pico de la onda fue de 22 ± 2 ms y 40 ± 7 ms, diferencias que, según la literatura citada por los autores, equivaldrían aproximadamente a errores de 11 y 20 mmHg, respectivamente. El comportamiento del PAT medido en el pie mostró una relación en U con la presión de contacto, con un mínimo cercano a la presión diastólica digital, apoyando la idea de que la interacción entre pared arterial, presión transmural y propiedades viscoelásticas modifica no solo la amplitud de la onda, sino también sus marcas temporales. Desde la perspectiva clínica, el mensaje es directo: cualquier plataforma cuffless basada en PPG que no controle o no incorpore la presión de contacto en su modelo de calibración arrastra una fuente de sesgo potencialmente incompatible con los límites regulatorios habituales de error^[25].

Natarajan *et al.* trasladan esta discusión desde el artefacto hacia la extracción de información útil de la propia morfología de la onda y evaluaron si ciertos intervalos rápidos de ascenso del PPG añadían valor real a la estimación de cambios de presión arterial tras calibración. En 32 sujetos humanos, de los cuales 25% eran hipertensos, estudiados antes y después de respiración lenta, aritmética mental, prueba de frío y administración de nitroglicerina, construyeron modelos parsimoniosos con validación leave-one-subject-out. La incorporación del intervalo b-time del dedo y del parámetro Tiempo de tránsito segmentario (STT) del oído, combinados con Tiempo de llegada del pulso (PAT), redujo el error cuadrático medio para presión sistólica

en 6 a 7% respecto a modelos de referencia sin estas características, con significación estadística ($p < 0,022$), mientras que STT auricular junto con el ancho de pulso redujo el error para presión diastólica en 13% ($p = 0,003$). No obstante, los mismos autores muestran el otro lado del problema: cuando aplicaron su modelo de PPG a variaciones de presión de contacto fisiológica, la presión sistólica predicha cambió $12,0 \pm 1,7$ mmHg, frente a $7,2 \pm 0,7$ mmHg con el modelo de referencia basado en PAT, lo que indica que el refinamiento morfológico puede mejorar la sensibilidad al cambio hemodinámico, pero también aumentar la vulnerabilidad a condiciones de medición no controladas^[26].

Zhang *et al.* avanzan hacia una arquitectura más integradora mediante un sistema de adquisición simultánea de ECG, PPG y cardiografía por impedancia (ICG) diseñado para monitorización continua de presión arterial. En 40 voluntarios sanos recopilaban 400 minutos de señales y 4390 registros, y compararon distintos enfoques para predicción de presión arterial, encontrando que la combinación de características de PWA con un modelo XGBoost ofreció el mejor rendimiento. La media del error absoluto fue de $3,76 \pm 3,98$ mmHg para presión sistólica y $2,71 \pm 2,57$ mmHg para presión diastólica, con desempeño grado A según el estándar BHS. El aporte conceptual de este trabajo radica en que la incorporación de ICG añade información hemodinámica más cercana a volumen sistólico, gasto cardíaco y fases de eyección, superando la visión reducida de los sistemas centrados exclusivamente en la onda periférica. Aun así, el propio artículo reconoce una limitación importante para la aplicabilidad inmediata: el sistema sigue siendo más complejo y menos compacto que muchas soluciones comerciales basadas solo en PPG, lo que deja planteada la tensión entre precisión fisiológica y portabilidad cotidiana^[27].

Joung *et al.* evaluaron otro problema central del monitoreo continuo no invasivo: si un modelo basado en PPG puede sostener precisión razonable cuando la presión arterial del mismo sujeto cambia de forma marcada a lo largo del tiempo. Para ello desarrollaron PPG2BP-Net, una red neuronal convolucional con calibración, entrenada y validada de manera independiente por sujeto a partir de 4185 individuos seleccionados entre 25 779 casos quirúrgicos. En la cohorte de 629 sujetos analizada a los 20 minutos de la inserción de línea arterial, el modelo logró errores medios de $0,209 \pm 7,509$ mmHg para presión sistólica y $0,150 \pm 4,549$ mmHg para presión diastólica, pese a una alta variabilidad intraindividual reflejada por valores SDS de 15,375 y 8,745, respectivamente. El valor de esta propuesta no solo está en la magnitud del error, sino en haber abordado un escenario que con frecuencia queda subrepresentado en la literatura: el seguimiento de presiones variables en modelos no dependientes del mismo sujeto. Aun así, sus resultados provienen de

un entorno perioperatorio altamente monitorizado y con referencia invasiva, de modo que la extrapolación al uso ambulatorio cotidiano exige cautela^[28].

Ciesielski *et al.* exploran una vía distinta a la óptica periférica mediante *infrasonic hemodynography*, una tecnología intraauricular que capta vibraciones de baja frecuencia con micrófonos ubicados en el conducto auditivo. En 18 sujetos sometidos a cateterismo cardiaco, la señal obtenida mostró una correlación media de $r = 0,95$ con la onda de presión aórtica invasiva y una diferencia en el tiempo de apertura valvular aórtica de $1,6 \pm 12,1$ ms respecto al catéter, hallazgo que respalda un origen central más que periférico de la señal. En el subgrupo de 12 pacientes con registro suficiente para modelado, la desviación estándar de las diferencias entre la presión predicha y la de referencia fue de 4,1 mmHg para sistólica y 2,4 mmHg para diastólica usando datos de cateterismo, y de 5,8 mmHg y 3,7 mmHg, respectivamente, usando la propia señal intraauricular. La relevancia de esta aproximación reside en que intenta capturar una firma hemodinámica más próxima a la presión central y menos dependiente del lecho vascular periférico. Su limitación, también explícita, es que la calidad del registro depende de forma crítica del ajuste y sellado del audifono, de la anatomía del conducto auditivo y de la estabilidad del prototipo, variables que todavía impiden asumir un rendimiento homogéneo fuera de condiciones controladas^[29].

Inteligencia artificial y modelos predictivos en monitoreo hemodinámico

La inteligencia artificial (IA) ha incorporado al monitoreo hemodinámico una capacidad que antes era limitada: anticipar la hipotensión antes de su manifestación clínica. Su interés no radica solo en identificar un descenso inminente de la presión arterial media, sino en permitir una intervención más temprana y fisiológicamente dirigida. Aun así, la utilidad real de estos modelos depende de dos condiciones: mantener un buen rendimiento predictivo en escenarios clínicos variables y demostrar que esa anticipación modifica desenlaces relevantes, no únicamente métricas del monitoreo^{[10][30]}.

Mohammadi *et al.*, en una revisión sistemática con metaanálisis de 43 estudios, mostraron que el Hypotension Prediction Index (HPI) alcanzó un AUROC agrupado de 0,89 entre 5 y 15 minutos antes de la hipotensión intraoperatoria, mientras que otros modelos predictivos lograron un AUROC de 0,79 (IC 95%: 0,74–0,83). El uso de HPI se asoció también con menor duración de hipotensión, menor time-weighted average de presión arterial media <65 mmHg y menor carga total de episodios hipotensivos, aunque los autores advierten heterogeneidad metodológica y posible sesgo de publicación. En una línea similar, Pilakouta Depaskouale *et al.* confirmaron que los algoritmos guiados por HPI

reducen la exposición a hipotensión intraoperatoria, con diferencias significativas en TWA-MAP <65, número de episodios y duración acumulada, aunque sin evidencia sólida y consistente de mejoría sobre desenlaces clínicos mayores^{[10][31]}.

La interpretación de estos hallazgos exige cautela. Jacquet-Lagrèze *et al.* demostraron que un modelo matemático más simple, basado en extrapolación lineal de la presión arterial media, alcanzó AUROC de 0,87, 0,81 y 0,69 a 1, 2 y 5 minutos antes del evento hipotensivo, lo que recuerda que el valor de la IA debe compararse con estrategias fisiológicas razonables y no solo con predictores débiles. En paralelo, Brusasco *et al.* observaron en pacientes sometidos a cistectomía radical que una estrategia proactiva guiada por HPI redujo el número, duración y severidad de episodios hipotensivos, con menor frecuencia de complicaciones infecciosas y menor estancia hospitalaria; aun así, otros ensayos no han mostrado beneficios consistentes sobre complicaciones posoperatorias^{[30][32][33]}. Lo anterior apoya a la IA como sistema de alerta temprana con capacidad para disminuir la carga de hipotensión, aunque su mejor papel actual parece ser complementar la interpretación hemodinámica individualizada más que reemplazar el juicio clínico.

La evidencia reunida muestra que la modernización del monitoreo hemodinámico no depende de una sola tecnología, sino de la convergencia entre herramientas capaces de explorar perfusión tisular, registrar señales vasculares de manera menos invasiva y anticipar trayectorias de deterioro circulatorio mediante modelos analíticos cada vez más complejos. Esta progresión metodológica permite apreciar mejor la relación entre factibilidad técnica, rendimiento diagnóstico y aplicabilidad clínica en escenarios críticos y perioperatorios (Tabla 1).

Conclusiones

El monitoreo hemodinámico contemporáneo ya no puede entenderse como la simple recolección seriada de variables cardiovasculares. Su desarrollo reciente apunta a una integración progresiva entre fisiología, tecnología y analítica predictiva, en la que el valor clínico proviene de interpretar el riesgo circulatorio en varios niveles, desde el lecho microvascular hasta la probabilidad de eventos inminentes durante el acto perioperatorio o la enfermedad crítica.

La verdadera proyección de este campo dependerá menos de la novedad de cada dispositivo y más de su capacidad para incorporarse a decisiones clínicas oportunas, reproducibles y contextualizadas. En esa transición, el reto no es solo medir mejor, sino reconocer qué información modifica conductas, en qué

Tabla 1. Estudios seleccionados sobre microcirculación, tecnologías no invasivas e inteligencia artificial aplicadas al monitoreo hemodinámico.

Sección	Autor principal	Diseño	Muestra	Objetivo	Hallazgos principales	Referencia
Microcirculación y perfusión tisular	De Backer	Revisión narrativa	No aplica	Revisar la fisiopatología y evaluación microcirculatoria en sepsis.	La alteración microvascular se caracteriza por menor densidad capilar, menor perfusión y mayor heterogeneidad del flujo, asociadas con peor pronóstico.	[17]
Microcirculación y perfusión tisular	Cho	Observacional prospectivo	109 pacientes	Determinar si la reactividad microvascular intraoperatoria predice eventos adversos en cirugía cardíaca con CPB.	La pendiente de recuperación del VOT durante CPB predijo MAE con AUROC 0,701; punto de corte <1,08%/s, sensibilidad 62,5% y especificidad 72,7%.	[18]
Microcirculación y perfusión tisular	Domizi	Observacional prospectivo	50 pacientes	Evaluar el efecto del acetaminofén sobre microcirculación en sepsis y choque séptico.	Mejoraron la densidad vascular perfundida, el MFI y la reactividad microvascular periférica tras la intervención.	[19]
Microcirculación y perfusión tisular	Dyminski Parente Ribeiro	Experimental preclínico	6 ratones	Desarrollar un modelo murino para evaluar perfusión sublingual y vasomoción en endotoxemia.	El LPS redujo PPV y MFI; el modelo fue factible para estudiar alteraciones microcirculatorias tempranas.	[20]
Microcirculación y perfusión tisular	Shao	Experimental in vivo	Modelo murino	Explorar si las pinzas ópticas pueden restaurar flujo en microvasos hipoperfundidos.	La redirección de eritrocitos mejoró la reperusión en ramas de bajo flujo, como prueba de concepto terapéutica.	[21]
Microcirculación y perfusión tisular	Wang	Observacional prospectivo	200 pacientes	Evaluar parámetros microcirculatorios y cEEG para predecir SAE y pronóstico.	La combinación de microcirculación y cEEG alcanzó AUC 0,92 y se asoció con mortalidad a 28 días, HR 3,45.	[22]
Tecnologías no invasivas	Henry	Revisión narrativa	No aplica	Revisar tecnologías cuffless para monitorización de presión arterial.	Las plataformas son prometedoras, aunque persisten limitaciones en precisión, calibración, estandarización y regulación.	[23]
Tecnologías no invasivas	Yang	Revisión clínica	No aplica	Analizar la utilidad clínica y limitaciones de los dispositivos cuffless.	Muchos dispositivos siguen mejor los cambios relativos que la presión absoluta; la autocalibración puede inducir errores relevantes.	[24]
Tecnologías no invasivas	Chandrasekhar	Experimental en humanos	17 voluntarios	Evaluar el efecto de la presión de contacto del sensor PPG sobre PAT.	La presión de contacto alteró significativamente el PAT, con errores equivalentes aproximados de 11 a 20 mmHg.	[25]
Tecnologías no invasivas	Natarajan	Experimental con validación cruzada	32 sujetos	Desarrollar modelos basados en morfología de PPG para estimar cambios de presión arterial.	La incorporación de parámetros morfológicos redujo el error en PAS y PAD, aunque con sensibilidad a condiciones de medición.	[26]
Tecnologías no invasivas	Zhang	Desarrollo tecnológico	40 voluntarios	Diseñar un sistema ECG-PPG-ICG para monitorización continua de presión arterial.	El modelo con PWA y XGBoost logró un error absoluto medio de 3,76 mmHg en PAS y 2,71 mmHg en PAD.	[27]
Tecnologías no invasivas	Joung	Desarrollo y validación de red neuronal	4185 sujetos; 629 analizados	Desarrollar un modelo basado en PPG para estimar presión arterial con alta variabilidad intraindividual.	PPG2BP-Net mostró errores medios de $0,209 \pm 7,509$ mmHg en PAS y $0,150 \pm 4,549$ mmHg en PAD.	[28]

Tecnologías no invasivas	Ciesielski	Validación tecnológica	18 sujetos; 12 para modelado	Evaluar la infrasonic hemodynography intraauricular para monitorización no invasiva de presión arterial.	La señal mostró correlación $r = 0,95$ con la presión aórtica invasiva; error bajo en la estimación de PAS y PAD.	[29]
IA y modelos predictivos	Mohammadi	Revisión sistemática y metaanálisis	43 estudios	Cuantificar la capacidad predictiva de modelos de IA para hipotensión intraoperatoria.	HPI mostró AUROC agrupado de 0,89; otros modelos, AUROC 0,79; se observó menor carga de hipotensión con HPI.	[10]
IA y modelos predictivos	Pilakouta Depaskouale	Revisión sistemática y metaanálisis	14 estudios	Evaluar si HPI reduce la hipotensión intraoperatoria.	Redujo TWA-MAP<65, número de episodios y duración acumulada de hipotensión.	[31]
IA y modelos predictivos	Jacquet-Lagréze	Retrospectivo de exactitud diagnóstica	83 pacientes	Comparar LepMAP con variación de MAP para predecir hipotensión.	LepMAP mostró AUROC de 0,87, 0,81 y 0,69 a 1, 2 y 5 minutos, respectivamente.	[33]
IA y modelos predictivos	Brusasco	Prospectivo antes-después	132 pacientes	Comparar estrategia guiada por HPI frente a GDT en cistectomía radical.	HPI redujo número, duración y severidad de episodios hipotensivos, con menor tasa de infección y estancia hospitalaria.	[30]
IA y modelos predictivos	Pilakouta Depaskouale	Ensayo clínico aleatorizado	No precisado en el fragmento revisado	Evaluar HPI en cirugía de columna en decúbito prono.	No redujo de forma significativa el TWA de hipotensión ni mostró diferencias claras en complicaciones posoperatorias.	[32]

Descripción: Comparación de los estudios incluidos sobre microcirculación y perfusión tisular, tecnologías no invasivas para evaluación vascular y presión arterial continua, e inteligencia artificial aplicada al monitoreo hemodinámico. Se integran el diseño metodológico, la población analizada, el objetivo de cada investigación y sus principales hallazgos, lo que permite apreciar la progresión del campo desde la evaluación fisiopatológica de la perfusión hasta el desarrollo de herramientas predictivas orientadas a optimizar la toma de decisiones clínicas. Abreviaturas: CPB, circulación extracorpórea; NIRS, espectroscopia de infrarrojo cercano; VOT, prueba de oclusión vascular; MAE, eventos adversos mayores; MFI, índice de flujo microvascular; LPS, lipopolisacárido; PPV, proporción de vasos perfundidos; SAE, encefalopatía asociada a sepsis; cEEG, electroencefalografía continua; PPG, fotopletimografía; PAT, tiempo de llegada del pulso; PTT, tiempo de tránsito del pulso; STT, slope transit time; ECG, electrocardiografía; ICG, bioimpedancia cardiaca; PWA, análisis de la onda de pulso; BHS, British Hypertension Society; IA, inteligencia artificial; HPI, Hypotension Prediction Index; AUROC, área bajo la curva receiver operating characteristic; TWA-MAP<65, promedio ponderado en el tiempo de presión arterial media menor de 65 mmHg; GDT, goal-directed therapy.

pacientes aporta beneficio y bajo qué condiciones su implementación puede traducirse en una monitorización más precisa, prudente e individualizada.

Informacion Complementaria

Contribución de los autores (Taxonomía CrediT): MMG, EAJZ, GEGA, NCOV y WDCY participaron en: Conceptualización, curación de datos/literatura, investigación, metodología, validación y redacción del borrador original. SGBM participó en: Conceptualización, curación de datos/literatura, investigación, metodología, administración del proyecto, supervisión, validación, redacción del borrador original, redacción, revisión y edición, y correspondencia editorial.

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de interés relacionados con el presente manuscrito.

Financiamiento: Autofinanciado.

Disponibilidad de datos: No aplica por tratarse de una revisión narrativa. Las fuentes consultadas corresponden a literatura científica publicada y citada en el manuscrito.

Agradecimientos: No aplica.

Declaración de uso de herramientas de inteligencia artificial (IA): Los autores declaran que no se utilizaron herramientas de inteligencia artificial en ninguna etapa de la elaboración, redacción, análisis, traducción, edición de estilo, revisión bibliográfica, revisión de formato de citación ni organización editorial del manuscrito. Todo el contenido fue elaborado, revisado, verificado y validado directamente por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, integridad, originalidad y contenido científico del manuscrito.

En el proceso editorial, incluida la revisión por pares, se desarrolló conforme a la política de la revista sobre el uso responsable de herramientas de IA.

Referencias

- Bartha E, Arfwedson C, Imnell A, Kalman S. Towards individualized perioperative, goal-directed haemodynamic algorithms for patients of advanced age: observations during a randomized controlled trial (NCT01141894). *Br J Anaesth*. 2016;116(4):486–92. DOI: 10.1093/bja/aew025.
- Wrzosek A, Jakowicka-Wordliczek J, Zajackowska R, Serednicki WT, Jankowski M, Bala MM, et al. Perioperative restrictive versus goal-directed fluid therapy for adults undergoing major non-cardiac surgery. *Cochrane Database Syst Rev*. 2019;2019(12). DOI: 10.1002/14651858.CD012767.pub2.
- Gurgel ST, Do Nascimento P. Maintaining tissue perfusion in high-risk surgical patients: A systematic review of randomized clinical trials. *Anesth Analg*. 2011;112(6):1384–91. DOI: 10.1213/ANE.0b013e3182055384.
- Saugel B, Cecconi M, Wagner JY, Reuter DA. Noninvasive continuous cardiac output monitoring in perioperative and intensive care medicine. *Br J Anaesth*. 2015;114(4):562–75. DOI: 10.1093/bja/aew447.
- Guarracino F, Baldassarri R, Priebe HJ. Revised ESC/ESA Guidelines on non-cardiac surgery: cardiovascular assessment and management. Implications for preoperative clinical evaluation. *Minerva Anesthesiol*. 2015;81(2):226–33.
- Dünser MW, Dubin A. There is more to septic shock than arterial hypotension and elevated lactate levels: another appeal to rethink current resuscitation strategies! *Ann Intensive Care*. 2018;8(1):13613. DOI: 10.1186/s13613-018-0406-6.
- Monnet X, Delaney A, Barnato A. Lactate-guided resuscitation saves lives: no. *Intensive Care Med*. 2016;42(3):470–1. DOI: 10.1007/s00134-016-4235-5.
- Kataria S, Singh O, Juneja D, Goel A, Bhide M, Yadav D. Hypoperfusion context as a predictor of 28-d all-cause mortality in septic shock patients: A comparative observational study. *World J Clin Cases*. 2023;11(16):3765–79. DOI: 10.12998/wjcc.v11.i16.3765.
- Vos JJ, Kalmar AF, Struys MMRF, Wietasch JKG, Hendriks HGD, Scheeren TWL. Comparison of arterial pressure and plethysmographic waveform-based dynamic preload variables in assessing fluid responsiveness and dynamic arterial tone in patients undergoing major hepatic resection. *Br J Anaesth*. 2013;110(6):940–6. DOI: 10.1093/bja/aes508.
- Mohammadi I, Firouzabadi SR, Hosseinpour M, Akhlaghpasand M, Hajikarimloo B, Tavaneai R, et al. Predictive ability of hypotension prediction index and machine learning methods in intraoperative hypotension: a systematic review and meta-analysis. *J Transl Med*. 2024;22(1):1–2. DOI: 10.1186/s12967-024-05481-4.
- Maheshwari K, Buddi S, Jian Z, Settels J, Shimada T, Cohen B, et al. Performance of the Hypotension Prediction Index with non-invasive arterial pressure waveforms in non-cardiac surgical patients. *J Clin Monit Comput*. 2021;35(1):71–8. DOI: 10.1007/s10877-020-00463-5.
- Bouchez S, De Backer D, Fraipont V, Momeni M, Rex S, De Hert S. Perioperative hemodynamic monitoring techniques: a narrative review. *Acta Anaesthesiol Belg*. 2024;75(2):125–38. DOI: 10.56126/75.2.40.
- Quintão VC, Jreige Júnior A, Rizk SI, Hajjar LA. Haemodynamic monitoring in the perioperative setting. *Curr Opin Crit Care*. 2023;29(3):268–74. DOI: 10.1097/MCC.0000000000001042.
- Pinsky MR, Cecconi M, Chew MS, De Backer D, Douglas I, Edwards M, et al. Effective hemodynamic monitoring. *Crit Care*. 2022;26(1):1–10. DOI: 10.1186/s13054-022-04173-z.
- Saugel B. Intraoperative haemodynamic monitoring and management of adults having non-cardiac surgery: Guidelines of the German Society of Anaesthesiology and Intensive Care Medicine in collaboration with the German Association of the Scientific Medical Societies. *J Clin Monit Comput*. 2024;38(5):941–4. DOI: 10.1007/s10877-024-01203-9.
- Monnet X, Messina A, Greco M, Bakker J, Aissaoui N, Cecconi M, et al. ESICM guidelines on circulatory shock and hemodynamic monitoring 2025. *Intensive Care Med*. 2025;51(11):1971–2012. DOI: 10.1007/s00134-025-08137-z.
- De Backer D. Novelities in the evaluation of microcirculation in septic shock. *J Intensive Med*. 2023;3(2):124–30. DOI: 10.1016/j.jointm.2022.09.002.
- Cho AR, Lee HJ, Hong JM, Kang C, Kim HJ, Kim EJ, et al. Microvascular reactivity as a predictor of major adverse events in patients with on-pump cardiac surgery. *Korean J Anesthesiol*. 2022;75(4):338–49. DOI: 10.4097/kja.22097.
- Domizi R, Damiani E, Carsetti A, Graciotti L, Procopio AD, Scorpella C, et al. Potential of acetaminophen on the sublingual microcirculation and peripheral tissue perfusion of febrile septic patients: prospective observational study. *Ann Intensive Care*. 2024;14(1). DOI: 10.1186/s13613-024-01251-z.
- Dyminski Parente Ribeiro E, Dastan M, Bellut-Staack U, Zhou J, Lehmann C. Minimally-Invasive Imaging of Sublingual Vessels—A New Method to Study Microvascular Changes in Mice. *Life*. 2025;15(9):1–16. DOI: 10.3390/life15091478.
- Shao M, Zhong MC, Wang Z, Ke Z, Zhong Z, Zhou J. Non-Invasive Dynamic Reperfusion of Microvessels In Vivo Controlled by Optical Tweezers. *Front Bioeng Biotechnol*. 2022;10(July):1–9. DOI: 10.3389/fbioe.2022.952537.
- Wang Z, Cui Y. Study on the predictive value of early microcirculation perfusion indicators combined with neuroelectrophysiological monitoring for the occurrence and prognosis of sepsis-associated encephalopathy in neurocritical care patients. *Front Neurol*. 2025;16(December):1–11. DOI: 10.3389/fneur.2025.1692473.
- Henry B, Merz M, Hoang H, Abdulkarim G, Wosik J, Schoettker P. Cuffless Blood Pressure in clinical practice: challenges, opportunities and current limits. *Blood Press*. 2024;33(1). DOI: 10.1080/08037051.2024.2304190.
- Yang E, Schutte AE, Stergiou G, Wyss FS, Commodore-Mensah Y, Odili A, et al. Cuffless Blood Pressure Measurement Devices - International Perspectives on Accuracy and Clinical Use: A Narrative Review. *JAMA Cardiol*. 2025;10(6):624–31. DOI: 10.1001/jamacardio.2025.0662.
- Chandrasekhar A, Yavarimanesh M, Natarajan K, Hahn JO, Mukkamala R. PPG Sensor Contact Pressure Should Be Taken into Account for Cuff-Less Blood Pressure Measurement. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2020;67(11):3134–40. DOI: 10.1109/TBME.2020.2976989.
- Natarajan K, Block RC, Yavarimanesh M, Chandrasekhar A, Mestha LK, Inan OT, et al. Photoplethysmography Fast Upstroke Time Intervals Can Be Useful Features for Cuff-Less Measurement of Blood Pressure Changes in Humans. *IEEE Trans Biomed Eng*. 2022;69(1):53–62. DOI: 10.1109/TBME.2021.3087105.
- Zhang N, Zhang Y, Chen J, Qiu S, Ma J, Tan L, et al. Multi-Signal Acquisition System for Continuous Blood Pressure Monitoring. *Sensors*. 2025;25(18):1–22. DOI: 10.3390/s25185910.
- Joung J, Jung CW, Lee HC, Chae MJ, Kim HS, Park J, et al. Continuous cuffless blood pressure monitoring

- using photoplethysmography-based PPG2BP-net for high intrasubject blood pressure variations. *Sci Rep.* 2023;13(1):1–12. DOI: [10.1038/s41598-023-35492-y](https://doi.org/10.1038/s41598-023-35492-y).
29. Ciesielski R, Wong CS, Panchal J, Grela J, Dimalanta C, Walton A, *et al.* Non-invasive blood pressure monitoring with in-ear infrasonic hemodynography for preventative cardiovascular care. *npj Cardiovasc Heal.* 2025;2(1). DOI: [10.1038/s44325-025-00076-4](https://doi.org/10.1038/s44325-025-00076-4).
30. Brusasco C, Micali M, Cucciolini G, Filolli D, Gandini M, Lattuada M, *et al.* Comparison of Hemodynamic Management by Hypotension Prediction Index or Goal-Directed Therapy in Radical Cystectomies: A Prospective Observational Study. *J Clin Med.* 2025;14(17):1–15. DOI: [10.3390/jcm14176285](https://doi.org/10.3390/jcm14176285).
31. Pilakouta Depaskouale MA, Archonta SA, Katsaros DM, Paidakakos NA, Dimakopoulou AN, Matsota PK. Beyond the debut: unpacking six years of Hypotension Prediction Index software in intraoperative hypotension prevention - a systematic review and meta-analysis. *J Clin Monit Comput.* 2024;38(6):1367–77. DOI: [10.1007/s10877-024-01202-w](https://doi.org/10.1007/s10877-024-01202-w).
32. Pilakouta Depaskouale MA, Archonta SA, Moutafidou S, Paidakakos NA, Dimakopoulou AN, Matsota PK. Effectiveness of hypotension prediction index software in reducing intraoperative hypotension in prolonged prone-position spine surgery: a single-center clinical trial. *J Clin Monit Comput.* 2025;39(5):875–87. DOI: [10.1007/s10877-025-01303-0](https://doi.org/10.1007/s10877-025-01303-0).
33. Jacquet-Lagrèze M, Larue A, Guilherme E, Schweizer R, Portran P, Ruste M, *et al.* Prediction of intraoperative hypotension from the linear extrapolation of mean arterial pressure. *Eur J Anaesthesiol.* 2022;39(7):574–81. DOI: [10.1097/EJA.0000000000001693](https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000001693).