

DOI: 10.25237/revchilanestv55n4-02

Inteligencia artificial en anestesiología: Revisión sistemática de aplicaciones en predicción de riesgos, medicina personalizada y simulación clínica

Artificial intelligence in anesthesiology: A systematic review of applications in risk prediction, personalized medicine, and clinical simulation

Rogelio López Martínez^{1,*} ¹ Anestesiólogo. ABC Medical center. México.

Fuente de financiamiento: Ninguna.

Conflicto de intereses: Ninguno.

Fecha de recepción: 23 de enero de 2025 / Fecha de aceptación: 08 de octubre de 2025

ABSTRACT

Modern anesthesiology undergoes fundamental transformation from reactive protocol-based models toward personalized data-driven approaches, particularly through artificial intelligence integration. The abundance of perioperative data from electronic health records and high-frequency monitors has created unprecedented opportunities for applying machine learning and deep learning algorithms in perioperative care optimization[1]. This analysis synthesizes high-impact scientific literature published between 2021-2025 regarding principal artificial intelligence applications in anesthesiology, focusing on three foundational pillars: perioperative risk stratification, personalized medicine through closed-loop systems and pharmacogenomics, and clinical simulation for training and preoperative planning. Artificial intelligence models consistently outperform traditional systems, achieving area under the receiver operating characteristic curve up to 0.97 for 30-day postoperative mortality prediction and 0.78-0.90 for acute kidney injury. Closed-loop anesthesia delivery systems demonstrate superior hemodynamic stability with reduced pharmacological consumption. This driven simulation and digital twins revolutionize training while enabling personalized preoperative rehearsal[2]. Artificial intelligence redefines anesthetic care standards, transforming data into actionable clinical intelligence. However, widespread clinical integration requires overcoming technical challenges including generalization and interpretability, establishing robust ethical-regulatory frameworks toward an "augmented anesthesiologist" model.

Keywords: Artificial intelligence, closed-loop anesthesia, machine learning, deep learning, area under the receiver operating characteristic curve.

RESUMEN

La anestesiología moderna transita de un modelo reactivo basado en protocolos hacia un enfoque personalizado centrado en datos mediante la integración de inteligencia artificial. La abundancia de información perioperatoria ha creado oportunidades para aplicar algoritmos de aprendizaje automático y profundo en la optimización del cuidado perioperatorio[1]. Este análisis sintetiza la literatura científica publicada entre 2021-2025 sobre aplicaciones de inteligencia artificial en anestesiología, enfocándose en estratificación del riesgo perioperatorio, medicina personalizada mediante sistemas de bucle cerrado y farmacogenómica, y simulación clínica para formación. Los modelos de inteligencia artificial superan consistentemente a los sistemas tradicionales, alcanzando resultados de área bajo la curva característica operativa del receptor de hasta 0,97 en mortalidad postoperatoria a 30 días y 0,78-0,90 en lesión renal aguda. Los sistemas de administración de anestesia en bucle cerrado demuestran mayor estabilidad hemodinámica con reducción del consumo farmacológico[2]. Ésto a través de transformar datos en inteligencia clínica procesable, aunque su integración requiere superar desafíos técnicos, éticos y regulatorios hacia un modelo de "anestesiólogo aumentado".

Palabras clave: Inteligencia artificial, anestesia en bucle cerrado, aprendizaje automático, aprendizaje profundo, área bajo la curva característica operativa del receptor.

*Autor de correspondencia:

Rogelio López Martínez
roveli96@gmail.com

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-8734>

ISSN: 0719-6792



Introducción

La anestesiología ha evolucionado drásticamente desde un enfoque reactivo fundamentado en protocolos estandarizados hacia una nueva etapa caracterizada por la abundancia de datos digitales. Los quirófanos modernos generan flujos continuos de información de alta frecuencia provenientes de monitores fisiológicos o ventiladores creando la paradoja “rico en datos, pobre en información”: la cantidad de datos disponibles supera la capacidad cognitiva humana para su integración efectiva en tiempo real[3].

Este desafío cataliza la introducción de inteligencia artificial (IA) en el ámbito perioperatorio, no como novedad tecnológica sino como herramienta esencial para transformar datos crudos en conocimiento clínico procesable. El objetivo fundamental es transitar del modelo de objetivos únicos hacia medicina de precisión, donde el plan anestésico se adapta meticulosamente al perfil único de cada paciente[4].

La inteligencia artificial abarca la creación de máquinas capaces de realizar tareas que requieran inteligencia humana. El aprendizaje automático (Machine Learning, ML), subcampo de la IA, desarrolla algoritmos que aprenden de datos para hacer predicciones sin programación explícita, identificando patrones complejos no lineales particularmente valiosos en medicina perioperatoria. El aprendizaje profundo (Deep Learning, DL) utiliza redes neuronales artificiales multicapa para aprender representaciones de datos con múltiples niveles de abstracción, demostrando rendimiento excepcional en análisis de imágenes médicas y procesamiento de señales fisiológicas complejas[5].

Esta revisión sistemática evalúa y sintetiza evidencia de alto impacto (de los años 2021-2025) sobre aplicaciones de IA en anestesiología, en tres áreas primordiales: cálculo de riesgos perioperatorios mediante modelos ML para estratificación precisa; medicina personalizada aplicando IA para individualizar terapia desde sistemas automatizados hasta farmacogenómica; simulación y formación empleando IA, realidad virtual (Virtual Reality, VR) y aumentada (Augmented Reality, AR) para revolucionar la educación médica y planificación procedimental. Se realizaron búsquedas exhaustivas en bases de datos académicas prominentes, con criterios de inclusión centrados en artículos con validación clínica, preferentemente prospectiva y multicéntrica[6].

Desarrollo

Estratificación de riesgos perioperatorios impulsada por Inteligencia Artificial

La promesa fundamental de la inteligencia artificial (IA) reside en facilitar atención verdaderamente personalizada, adaptando intervenciones terapéuticas al paciente individual en tiempo real, alejándose de regímenes basados en población hacia optimización dinámica basada en respuesta fisiológica y predisposición genética[5].

La evaluación preoperatoria del riesgo constituye una piedra angular anestesiológica actual. Las herramientas tradicionales como el sistema de clasificación del estado físico de la Sociedad Americana de Anestesiólogos (ASA-PS) o el índice cardíaco revisado (RCRI), aunque útiles, resultan subjetivas en el marco de la

medicina personalizada actual, pues individualmente, cada escala omite un rango muy extenso de variables importantes para el manejo perioperatorio del paciente, sobre todo en cuanto a la traducción real de riesgos personalizados de morbilidad o complicaciones específicas ajustadas a tipo de cirugía, comorbilidades, entre otros. Los modelos de aprendizaje automático emergen como alternativa superior, demostrando consistentemente mayor precisión al analizar grandes volúmenes de datos preoperatorios, evolucionando hacia la creación de un “fenotipo de riesgo” holístico específico para cada paciente[7].

Los modelos de aprendizaje profundo también demuestran rendimiento sobresaliente en predicción de mortalidad posoperatoria. Estudios a gran escala reportan resultados de área bajo la curva característica operativa del receptor (AUROCs) entre 0,91-0,97 para mortalidad hospitalaria. Un estudio multicéntrico con 276.341 pacientes desarrolló un modelo para optimización de gradiente extremo (Extreme Gradient Boosting, XGBoost) alcanzando AUROC de 0,960 en desarrollo y 0,932 en validación externa, demostrando potencial de generalización[8].

Las innovaciones recientes exploran información no estructurada en notas clínicas. Un enfoque utilizando grandes modelos de lenguaje (Large Language Models, LLMs) con generación aumentada por recuperación logró F1-score de 0,4663 para mortalidad a 30 días, superando otros modelos ML, sugiriendo que los LLMs capturan el matiz y razonamiento clínico implícito en narrativa médica[9].

Estos avances, hacen posible que en un futuro temprano, el anestesiólogo pueda trabajar con una gran cantidad de datos clínicos en tiempo real en un breve corto de tiempo, a la vez que el procesamiento de los mismos lleve a cálculos de riesgos perioperatorios en vivo, con cada paciente al que atienda, para centrarse en los aspectos más trascendentales personalizados a cuidar y prever en cada caso específico.

Predicción de eventos cardiovasculares adversos mayores

Aunque la literatura específica combinando IA y anestesiología para Eventos Cardiovasculares Adversos Mayores (MACE) es menos madura, las plataformas de riesgo integradas evalúan el espectro de complicaciones simultáneamente, proporcionando visión completa del perfil de riesgo cardiovascular, superando índices tradicionales basados en variables limitadas y genéricas[10].

MySurgeryRisk (algoritmo de riesgo preoperatorio) representa la culminación del fenotipado de riesgo holístico, utilizando algoritmos ML aplicados a registros electrónicos de salud preoperatorios (para generar puntuaciones probabilísticas de ocho complicaciones posoperatorias mayores y mortalidad a 1-24 meses) (lesión renal aguda, sepsis, tromboembolismo venoso, ingreso en la unidad de cuidados intensivos > 48 h, ventilación mecánica > 48 h, complicaciones de la herida, neurológicas y cardiovasculares y muerte hasta 24 meses después de la cirugía).

El rendimiento validado muestra AUROCs 0,82-0,94 para complicaciones y 0,77-0,83 para mortalidad. En estudios piloto, el algoritmo superó significativamente las evaluaciones médicas iniciales, sugiriendo su papel óptimo como herramienta de apoyo decisional que aumenta la experiencia humana[11].

Pronóstico perioperatorio de lesión renal aguda

La lesión renal aguda (LRA) posoperatoria, complicación frecuente con morbilidad significativa, encuentra en la IA herramientas potentes para predicción temprana, lo cual es vital ya que para el riñón, así como otros órganos, es bien sabido que el tiempo de acción es vida. En este sentido, los algoritmos XGBoost y aprendizaje automático automatizado (autoML) demuestran eficacia con AUROCs 0,78-0,90. Un estudio con 40.520 pacientes desarrolló un modelo basado en 18 variables perioperatorias alcanzando AUROC 0,803 en validación[12].

En cirugía cardíaca, autoML desarrolló un modelo preoperatorio logrando AUROC 0,79, comparable a Random Forest (bosque aleatorio, un algoritmo de aprendizaje automatizado) y superior a regresión logística tradicional. La integración de datos preoperatorios e intraoperatorios dinámicos mejora significativamente el rendimiento, subrayando la naturaleza multifactorial de la LRA[13].

Uso de aplicaciones IA para toma de decisiones

La capacidad de la IA para analizar grandes conjuntos de datos, reconocer patrones y generar modelos predictivos ha conducido a una prestación de atención médica más informada y eficiente. Modelos como ChatGPT, Claude AI, Gemini y Perplexity han demostrado el potencial para brindar orientación médica.

En un estudio se comparó y evaluó el rendimiento de los modelos de IA con respecto a la orientación médica para toma de decisiones en escenarios complejos, con un examen sistemático de los modelos ChatGPT-4, Claude AI (Pro), Google Bard (Pro) y Perplexity (Pro), contra consejo de expertos en departamentos de Anestesiología, Urgencias, Cuidados Críticos y Cardiología, con sustento en guías basadas en evidencia. Se encontró que las puntuaciones de claridad de ChatGPT y de exhaustividad de Claude AI eran más estables en escala de Likert, que sin embargo bajo regresión de Anova, se indicó una relación positiva moderada entre la precisión y la relevancia de Google Bard ($r = 0,550$, $p = 0,037$)[14].

De este estudio, se concluyó que hay una necesidad imperante de conocimiento basado en el contexto, para poder usar efectivamente estas aplicaciones de IA dentro de la práctica médica, pues refuerzan más no reemplazan el juicio humano, especialmente en situaciones de salud complejas, justo como las del anestesiólogo.

IA en el transoperatorio: Sistemas de administración de anestesia en bucle cerrado (CLADS)

Los CLADS, “pilotos automáticos” anestésicos, integran tres componentes: sensor fisiológico, algoritmo de control y actuador de administración farmacológica. Una revisión sistemática reciente de 32 estudios encontró que los sistemas de bucle cerrado reducen significativamente el tiempo fuera de rangos objetivo de presión arterial y acortan tiempos de recuperación. Comparados con control manual, los CLADS disminuyen consumo de propofol y reducen inestabilidad hemodinámica y disfunción cognitiva posoperatoria[2].

La tecnología evoluciona de sistemas univariados a controladores multivariados gestionando simultáneamente hipnosis,

analgesia y estabilidad hemodinámica. Sistemas como Conox (análisis de electroencefalograma continuo con índices qCon y qNox) para valorar profundidad de sedación y probabilidad de estimulación nociceptiva, parecen prometedores en diversos entornos quirúrgicos, pues permiten la titulación automatizada de hipnóticos y analgésicos en transoperatorio en un rango óptimo deseado, sin embargo, faltaría aún tiempo para que estos sistemas se validen y se ocupen en la práctica clínica para saber su real utilidad[15].

Gestión anestésica guiada por farmacogenómica

La farmacogenómica (PGx) explica la variabilidad interindividual en respuesta farmacológica mediante variaciones genéticas. Las interacciones gen-fármaco relevantes incluyen: enzima citocromo P450 2B6 (CYP2B6) para metabolismo de propofol/ketamina, asociada con reducción del aclaramiento; CYP2D6 crucial para metabolizar codeína a morfina, donde metabolizadores lentos obtienen poco alivio analgésico mientras ultrarrápidos experimentan toxicidad; CYP3A4/5 para metabolismo de fentanilo/midazolam; el gen OPRM1 (gen del receptor opioide Mu 1) afectando sensibilidad opioide, donde el polimorfismo A118G se asocia con mayores requerimientos analgésicos[16].

La IA con aprendizaje automático, puede ayudar en este ámbito a los anestesiólogos, a analizar conjuntos de datos grandes para predecir las respuestas a fármacos y adaptar los planes conforme la composición genética específica de cada paciente.

Sin embargo, pese al vasto conocimiento PGx, su aplicación rutinaria permanece limitada por falta de herramientas de apoyo decisional que integren datos genéticos fluidamente en el flujo de trabajo anestesiológico real.

Monitorización intraoperatoria inteligente

La IA transforma la monitorización de proceso reactivo a predictivo. El Índice de Predicción de Hipotensión (HPI), basado en análisis ML de forma de onda arterial, predice eventos hipotensores con 5-15 minutos de antelación. Un ensayo aleatorizado confirma que la mediana del tiempo de hipotensión por paciente fue menor en el grupo de intervención guiado versus el grupo control, de 8 minutos a 32,7 minutos correspondientemente, con una diferencia mediana de 16,7 minutos (IC del 95%, 7,7-31,0 minutos; $p < 0,001$), reduciendo la duración y gravedad de hipotensión intraoperatoria[17].

Para profundidad anestésica, modelos de redes neuronales analizando electroencefalografía continua (EEG) bruto, demuestran precisión superior en estimación, con correlación más fuerte con concentración alveolar mínima (CAM) y menor susceptibilidad a factores de confusión que monitores tradicionales, incluso en el uso de neuromonitoreo mixto como oxigenación territorial por infrarrojo, para mejorar la protección global del paciente[5].

Utilidad de IA fuera de quirófano: Simulación y educación impulsadas por IA

La formación anestesiológica está siendo transformada por tecnologías inmersivas e inteligentes, evolucionando la simulación de herramienta de entrenamiento genérica a plataforma de planificación preoperatoria de misión crítica mediante “gemelos digitales” del paciente.

La realidad virtual (Virtual Reality, VR) ofrece entornos inmersivos, seguros y repetibles para dominar habilidades técnicas sin riesgo. Su aplicación demuestra eficacia en: manejo de vía aérea difícil permitiendo práctica de procedimientos alto riesgo en escenarios anatómicos variados; anestesia regional guiada por ultrasonido desarrollando coordinación mano-ojo y reconocimiento neurovascular tridimensional; bloqueos neuroaxiales con retroalimentación háptica recreando sensación táctil de atravesar capas tisulares[18].

Realidad aumentada para guía intraoperatoria

La AR superpone información digital en el mundo real, actuando como “sistema de posicionamiento global procedimental”. Un anestesiólogo con gafas AR podría visualizar reconstrucción en 3D (tercera dimensión) espinal de tomografía computarizada (TC) preoperatoria superpuesta sobre el paciente, guiando una colocación epidural precisa. Durante bloqueos nerviosos, las imágenes ultrasonográficas en tiempo real podrían proyectarse con trayectoria de aguja y ubicación objetivo, mejorando precisión y seguridad[19].

La frontera más emocionante permite crear módulos formativos y planificación altamente personalizados mediante “gemelos virtuales” de pacientes complejos. Integrando modelos predictivos y datos farmacogenómicos en el motor de simulación, el anestesiólogo puede practicar en gemelo digital probando estrategias de manejo, observando efectos virtuales y optimizando el plan anestésico preoperatoriamente, transformando la simulación en plataforma de planificación personalizada de caso en vivo[19].

Los algoritmos DL, particularmente redes convolucionales como U-Net (red neuronal convolucional en forma de U), sobresalen en segmentación y reconocimiento de imágenes ultrasonográficas, identificando automáticamente estructuras anatómicas críticas. Sistemas como ScanNav (tecnología de *software* de IA para ultrasonido) demuestran precisión 93,5% en identificación anatómica relevante. Modelos U-Net reportan precisiones hasta 99,7% en identificación nerviosa y diferenciación vascular, resultando en mejora significativa de tasas de éxito para anestesia regional, reducción temporal procedimental y disminución de complicaciones[4].

Barreras para la integración clínica: Desafíos técnicos y de datos

La calidad y generalización de datos representa un desafío fundamental. Los datos de registros electrónicos de salud son heterogéneos, incompletos y no estandarizados entre instituciones. Un modelo desarrollado en centro único puede no funcionar bien en otra población con diferentes características. La validación externa multicéntrica rigurosa es requisito indispensable antes de la implementación clínica de estas herramientas.

La interpretabilidad del “problema de caja negra” constituye una barrera importante. Los médicos podrían no confiar fácilmente en recomendaciones tecnológicas para impactar en su práctica real, sobre todo si la comprensión de su base lógica es difícil o demasiado técnica. Esto impulsa el campo de IA Explicable (XAI), desarrollando modelos precisos y transparentes en su proceso decisional[20].

La privacidad y seguridad de datos requiere manejo seguro,

anonimizado y cumpliendo regulaciones regionales. El sesgo algorítmico presenta riesgo de perpetuar disparidades si modelos entrenados predominantemente en un grupo demográfico funcionan inferiormente en grupos subrepresentados. La responsabilidad clínica y legal permanece sin resolverse en este rubro: si un sistema IA recomienda acción causando daño, la determinación de responsabilidad entre clínico, hospital y desarrollador carece de marco legal claro.

Trayectoria futura: Un anestesiólogo aumentado

El futuro no apunta a la sustitución del clínico de ninguna manera, sino a su aumento con el uso de todas estas herramientas a su disposición. La visión del “anestesiólogo aumentado” supervisa múltiples sistemas IA, interpreta resultados y utiliza juicio clínico para decisiones de alto nivel. Tecnologías emergentes como aprendizaje automatizado permiten entrenar modelos en datos multi-hospitalarios sin compartir información cruda, mejorando generalización mientras se preserva la privacidad. La IA liberará al anestesiólogo de tareas cognitivas repetitivas, permitiendo enfoque selectivo en aspectos exclusivamente humanos: comunicación, empatía y decisiones éticas.

Conclusiones

Esta revisión sistemática consolida evidencia de que la IA cataliza una transformación fundamental en anestesiología, la medicina personalizada. Los hallazgos demuestran impacto clínico significativo en estratificación de riesgo, personalización de atención y mejora formativa. Los modelos ML/DL consistentemente superan métodos tradicionales con mejoras del 15%-25% en precisión predictiva.

Las contribuciones clave incluyen: precisión predictiva superior con AUROCs frecuentemente > 0,90 para resultados críticos; intervención proactiva y personalizada mediante herramientas como el índice predictor de hipotensión (Hypotension Prediction Index, HPI) y sistemas de alerta temprana; optimización de formación y planificación con simulación impulsada por IA y “gemelos digitales”.

El camino hacia integración completa requiere atención continua a desafíos pendientes. La validación clínica prospectiva multicéntrica permanece prioritaria para garantizar seguridad y eficacia en poblaciones diversas. El desarrollo de marcos éticos es indispensable para abordar los sesgos, privacidad y responsabilidad con los pacientes.

La visión emergente no es tecnología reemplazando al anestesiólogo, sino aumentándolo. La IA traduce datos perioperatorios en conocimiento procesable mediante colaboración con la tecnología, donde experiencia, empatía y juicio ético humano son magnificados por la capacidad computacional de la IA. Este enfoque de “anestesiólogo aumentado” cumplirá la promesa de atención perioperatoria más segura, eficaz y verdaderamente personalizada.

Referencias

1. Agrawal DK, Gonzalez K, Singh V, Miller M, Thankam FG, Ghimire A. Reshaping Anesthesia with Artificial Intelligence: From Con-

- cept to Reality. *Cureus*. 2024;16(10):e71486. PMID:39411370
2. Al Kaiati EH. The Positive Impacts of Artificial Intelligence in Anesthesia and Anesthesia Technology. *Pers Precis Med*. 2025;2(1):27–31. <https://doi.org/10.22034/pmj.2025.2057922.1056>.
3. Thange MS, Saravanan S, Deorankar PS, Bane SP, Chopade VP, Sontakke AS. Artificial Intelligence in General Anaesthesia: Applications in Monitoring, Prediction, and Automation. *Int J Innov Res Technol*. 2025;12(1):913–20.
4. Liu K, Wang H, Wang Y, Liu L, Jia X. Artificial intelligence revolutionizing anesthesia management: advances and prospects in intelligent anesthesia technology. *Front Med (Lausanne)*. 2024;11:1513424. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1513424>.
5. Zeng S, Qing Q, Xu W, Yu S, Zheng M, Tan H, et al. Personalized anesthesia and precision medicine: a comprehensive review of genetic factors, artificial intelligence, and patient-specific factors. *Front Med (Lausanne)*. 2024 May;11:1365524. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1365524> PMID:38784235
6. Hashemi S, Yousefzadeh Z, Abin AA, Ejmalian A, Nabavi S, Dabbagh A. Machine Learning-Guided Anesthesiology: A Review of Recent Advances and Clinical Applications. *J Cell Mol Anesth*. 2024;9(1):e145369. <https://doi.org/10.5812/jcma-145369>.
7. Cascella M, Tracey MC, Petrucci E, Bignami EG. Exploring Artificial Intelligence in Anesthesia: A Primer on Ethics, and Clinical Applications. *Surgeries*. 2023;4(2):264–274. MDPI <https://doi.org/10.3390/surgeries4020027>. PubMed CentralMDPI
8. Choi B, Oh AR, Lee SH, Lee DY, Lee JH, Yang K, et al. Prediction Model for 30-Day Mortality after Non-Cardiac Surgery Using Machine-Learning Techniques Based on Preoperative Evaluation of Electronic Medical Records [MDPI]. *J Clin Med*. 2022 Nov;11(21):6487. <https://doi.org/10.3390/jcm11216487> PMID:36362715
9. Chen YH, Ruan SJ, Chen PF. Predicting 30-day postoperative mortality and American Society of Anesthesiologists physical status using retrieval-augmented large language models: development and validation study. *J Med Internet Res*. 2025 Jun;27:e75052. <https://doi.org/10.2196/75052> PMID:40460423
10. Liu K, Qiu W, Yang X. Exploring the growth and impact of artificial intelligence in anesthesiology: a bibliometric study from 2004 to 2024. *Front Med (Lausanne)*. 2025;12:1595060. <https://doi.org/10.3389/fmed.2025.1595060>. frontiersin
11. Bihorac A, Ozrazgat-Baslanti T, Ebadi A, Motaei A, Madkour M, Pardalos PM, et al. MySurgeryRisk: Development and Validation of a Machine-Learning Risk Algorithm for Major Complications and Death after Surgery. *Ann Surg*. 2018;268(1):25–31. <https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000002457>.
12. Min JW, Min JH, Chang SH, Chung BH, Koh ES, Kim YS, et al. A Risk Prediction Model (CMC-AKIX) for Postoperative Acute Kidney Injury Using Machine Learning: Algorithm Development and Validation. *J Med Internet Res*. 2025;27:e62853. JMIR <https://doi.org/10.2196/62853>.
13. Thongprayoon C, Pattharanitima P, Kattah AG, Mao MA, Keddiss MT, Dillon JJ, et al. Explainable Preoperative Automated Machine Learning Prediction Model for Cardiac Surgery-Associated Acute Kidney Injury. *J Clin Med*. 2022;11(21):6264. mdpi <https://doi.org/10.3390/jcm11216264>. MDPI
14. Uppalapati VK, Nag DS. A Comparative Analysis of AI Models in Complex Medical Decision-Making Scenarios: Evaluating Chat-GPT, Claude AI, Bard, and Perplexity. *Cureus*. 2024;16(1):e52485. <https://doi.org/10.7759/cureus.52485>. NCBI +2
15. Kang J, Fang C, Li Y, Yuan Y, Niu K, Zheng Y, et al. Effects of qCON and qNOX-guided general anaesthesia management on patient opioid use and prognosis: a study protocol. *BMJ Open*. 2023 May;13(5):e069134. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2022-069134> PMID:37130687
16. Borbón A, Briceño J, Valderrama-Aguirre A. Pharmacogenomics tools for precision public health and lessons for low- and middle-income countries: a scoping review. *Pharmacogenomics Pers Med*. 2025;18:19–34. Available from: <https://doi.org/10.2147/PGPM.S490135>
17. Wijnberge M, Geerts BF, Hol L, Lemmers N, Mulder MP, Berge P, et al. Effect of a machine learning-derived early warning system for intraoperative hypotension vs standard care on depth and duration of intraoperative hypotension during elective noncardiac surgery: the HYPE randomized clinical trial. *JAMA*. 2020 Mar;323(11):1052–60. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.0592> PMID:32065827
18. Wang W, Gao L, Lin Y, Gao P. Virtual reality is emerging training applications for anesthesia simulation. *Eur J Med Res*. 2025;30(1):768. doi:10.1186/s40001-025-03054-9
19. Rama A, Caruso TJ. Innovation in simulation: using augmented reality and artificial intelligence for human centered medical education. *Med Res Arch*. 2025;13(7). Available from: <https://doi.org/10.18103/mra.v13i7.6788>
20. Gandotra S, Gupta S. Challenges to AI use in anesthesia and healthcare: An anesthesiologist's perspective. *Indian J Clin Anaesth*. 2023;10(4):371–375. <https://doi.org/10.18231/ijca.2023.077>.