

La era de la inteligencia artificial y su impacto en el aprendizaje de habilidades quirúrgicas de grado y posgrado: ¿El futuro de la cirugía?

The age of artificial intelligence and its impact on learning surgical skills: is it the future of surgery?

María H. Gaitán Buitrago , Marcela Velásquez Salazar , Jorge A. Montes Cardona , Luis F. Mosquera Solano 

Universidad del Quindío.
Grupo de Interés e
Investigación en Cirugía
(GIIcX-UQ). Armenia,
Colombia.

Los autores declaran no
tener conflictos
de interés.

*Conflicts of interest
None declared.*

Correspondencia
Correspondence:
María Helena Gaitán
Buitrago.
E-mail: mhgaitan@
uniquindio.edu.co

RESUMEN

Los cambios en la educación desafían a los profesores sobre cómo enseñar de la mejor manera y mejorar el desempeño de sus estudiantes. En el caso de la cirugía es necesario adquirir habilidades manuales que reflejen el pensamiento crítico y la capacidad de tomar decisiones en situaciones complejas, de manera rápida y eficaz. Así, la inteligencia artificial (IA) es una nueva herramienta que puede mejorar el desempeño de los estudiantes de grado y posgrado, así como repercutir en mejores desenlaces clínicos. El papel que debe desempeñar la enseñanza tradicional y el futuro de la enseñanza quirúrgica son cuestiones para resolver.

■ **Palabras clave:** *Inteligencia artificial, aprendizaje quirúrgico, educación quirúrgica.*

ABSTRACT

Educational changes present a challenge for teachers in terms of how to effectively teach and enhance student performance. Surgery demands manual dexterity that reflects critical thinking and the ability to make efficient decisions quickly in complex situations. Artificial Intelligence (AI) is a tool that can enhance the performance of both undergraduate and graduate students and improve clinical outcomes. The role of traditional teaching and the future of surgical education need to be addressed.

■ **Keywords:** *Artificial intelligence, surgical learning, surgical education*

Recibido | Received
23-06-22
Aceptado | Accepted
18-01-23

ID ORCID: María H. Gaitán Buitrago, 0000-0002-3794-0413; Marcela Velásquez Salazar, 0000-0003-2556-1202; Jorge A. Montes Cardona, 0000-0003-1542-8512; Luis F. Mosquera Solano, 0009-0004-3696-2460.

La enseñanza de la cirugía tanto en grado como en posgrado es un área compleja de la educación médica; está compuesta de la interacción entre el conocimiento científico, las habilidades técnicas y no técnicas, el acompañamiento teórico-práctico, la práctica deliberada del estudiante, y la experiencia del profesor que le ha permitido identificar puntos críticos en un procedimiento y crear “tips” para sus estudiantes¹⁻⁴, de tal manera que estos puedan aplicarlos cuando continúen su quehacer médico individual, es decir, una delicada combinación entre arte y ciencia, con el fin de formar a través de la mentoría en el profesionalismo y el arte de la cirugía⁵⁻⁸. Esta estrecha relación entre el profesor y el estudiante cumple con los estándares académicos y técnicos, pero cuenta con ese aprendizaje que un artesano enseña a su aprendiz; un aprendizaje que requiere un alto conocimiento científico, autodirigido y deliberado, pero nutrido por el saber de la motricidad con un matiz fenomenológico^{9,10}.

En este sentido, la educación quirúrgica persigue disminuir las curvas de aprendizaje, mejorar la toma de decisiones, desarrollar el pensamiento crítico y la alerta situacional, así como mejorar el desempeño técnico y, por ende, los desenlaces clínicos. Para alcanzar este nivel de experticia se sigue un esquema de adquisición de habilidades, como el propuesto por Dreyfus^{11,12} en el que se transita desde principiante hasta experto, mediante instrucción formal y habilidad en un sistema de práctica deliberada¹³. En consecuencia, se han desarrollado estrategias educativas como la simulación¹⁴⁻¹⁷, que, con el desarrollo de nuevas tecnologías, como el entrenamiento quirúrgico, el aumento del rendimiento intraoperatorio, la cirugía robótica y el telecoaching, permiten el seguimiento a los eventos en tiempo real y anticipación para replantear la conducta quirúrgica o alternativas técnicas haciendo intervenciones in situ.

De igual manera, el uso de la inteligencia artificial (IA) ha logrado una popularidad exponencial. Como consecuencia de la optimización del estudio de algoritmos que permiten, en situaciones específicas, representar e incluso perfeccionar diferentes procesos cognitivos de los seres humanos, tales como la toma de decisiones y la resolución de problemas^{18,19}, la IA, visión computarizada, realidad aumentada, navegación, visualización 3D y machine learning (ML) emergen como alternativas educativas, facilitando el análisis multimodal en desempeño técnico, fisiológico y funcional²⁰⁻²².

Todo ello se logra con una relación entre la educación quirúrgica, la innovación y la tecnología, sin perder de vista el objetivo final: la formación integral del estudiante y mejores desenlaces clínicos. Consecuentemente, sus beneficios han sido aprovechados en una importante variedad de áreas, incluyendo la medicina, hasta el punto de que diversos expertos manifiestan que la IA está transformando el cuidado de la salud mo-

derna²³⁻²⁵. Específicamente en el campo de la cirugía, el uso de estas tecnologías emergentes podría mejorar la eficiencia y los resultados de los tratamientos quirúrgicos al recopilar y procesar grandes cantidades de datos, así como proporcionar información útil a lo largo de la atención del paciente, desde la consulta inicial hasta el tratamiento posoperatorio²⁶.

Así como puede ser de utilidad para cirujanos experimentados, el uso de la IA en el aprendizaje quirúrgico representa un antes y un después en la forma como se adquieren dichas habilidades, permite a los estudiantes desarrollar competencias en entornos controlados y personalizados, adaptarse a las necesidades individuales incluso desde la formación en grado de medicina²⁷⁻²⁹ y mejorar la precisión, eficiencia y seguridad en la práctica clínica. En ese sentido, según Global Surgical AI Collaborative, ocurren 3-5% eventos adversos por año relacionados con procedimientos quirúrgicos, de los cuales 75% eran prevenibles, lo que representa un segmento de lo informado en la publicación *Errar es humano*, en el que los eventos relacionados con la atención médica corresponden a la tercera causa de muerte en Estados Unidos, lo que ha motivado el cambio en políticas de calidad asistencial y seguridad del paciente³⁰. Por ende, la educación médica tiene un alto impacto, específicamente en este caso la educación quirúrgica²²; y en el caso de los países con medios o bajos ingresos, es una alternativa segura. Dependiendo de la estrategia, también puede ser de utilidad en la formación de los estudiantes ante las limitaciones de disponibilidad de personal formado³¹ o el acceso a centros de práctica por capacidad instalada limitada.

De este modo, la IA permite la retroalimentación personalizada y brinda una experiencia quirúrgica inmersiva para la visualización de la anatomía del paciente³², la ejecución de procedimientos quirúrgicos de diferentes niveles de complejidad, y la medicina robótica³³ que se usa en la actualidad en centros de alto nivel de complejidad. Pero la planificación académica debe considerar la inclusión de la IA dentro del currículo^{19,34-36}, de una forma estructurada, transversal e integral, que permita a los estudiantes ser retroalimentados y asesorados sincrónica y asincrónicamente, tanto en ambientes simulados como en escenarios clínicos reales.

Es allí donde la IA trasciende el tecnicismo y permite que la información recolectada mediante grabaciones de simulaciones, y acompañamiento intraoperatorio e imágenes radiológicas del paciente facilite el análisis de datos para dar retroalimentación y desarrollar tecnologías que aportan información valiosa al aprendiz, tanto en casos simulados, como reales. De igual manera, esta información puede ser validada y estructurada para su implementación académica y clínica, e incluso hacer redes interinstitucionales que permitan alcanzar el consenso en la utilidad y aplicabili-

dad de la IA, así como la estandarización para trasladar estos datos a la educación quirúrgica en áreas como la evaluación y retroalimentación entre la simulación y el quirófano, como por ejemplo el uso de OSATS o la base de datos JIGSAWS. De este modo, la IA puede ayudar a eliminar los sesgos en la educación médica³⁷; más allá de los temores que la IA pueda suscitar, es una nueva herramienta con la capacidad de integrar enormes cantidades de datos, reconocer patrones y crear modelos que permitan resolver las limitaciones humanas, disminuir la carga médica, acelerar la atención, brindar tratamientos más personalizados y optimizar recursos³⁸⁻⁴¹.

Si bien los estudiantes de grado apenas se aventuran en el mundo quirúrgico, el unir la enseñanza tradicional con las herramientas tecnológicas actuales representa un gran avance en cuanto a su formación y en el desempeño profesional quirúrgico que decidan tomar. La IA facilita que la educación y la información sean precisas al tener acceso a miles de bases de datos y a las fuentes bibliográficas más fiables en la actualidad, con lo que los estudiantes puedan responder a todas las dudas de los pacientes y mejorar su confianza.

Por otra parte, se deben tomar en cuenta los aspectos bioéticos relacionados con la IA en la formación profesional, y la información e imágenes de los pacientes. Es importante mantener un equilibrio entre el uso de la IA y la educación médica integral, previniendo la deshumanización de la medicina. En este sentido, un gran reto para enfrentar es considerar el profesionalismo, la humanización y la empatía⁴² en la educación quirúrgica mediada por IA^{39,43}.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, Fazlollahi y cols.⁴⁴ realizaron el primer estudio que comparó la eficacia de una tutoría quirúrgica guiada por inteligencia artificial frente a la instrucción REMOTA de un experto en cirugía, encontrando una mejoría del rendimiento durante la práctica y los escenarios de simulación de alta fidelidad, cuando fueron guiados por un programa de IA. Sin embargo, los sujetos que pertenecían al grupo del instructor humano experimentaron mayor tranquilidad y confianza durante el entrenamiento al compararse con el grupo de la IA, aunque no se evidenciaron demandas cognitivas más altas ni peor rendimiento durante el procedimiento⁴⁴. Este estudio demostró que la supervisión y la evaluación formativa requirieron 53 horas menos al utilizar IA, en comparación con el modelo de instrucciones por un humano experto. A pesar de que los resultados fueron a favor del uso de la IA como método de aprendizaje, la mayoría de la población respondió que preferiría aprender tanto de la IA como de la instrucción tradicional. Con lo anterior se evidencia la importancia de considerar la IA como una herramienta adicional, que no sustituye en su totalidad los métodos tradicionales de enseñanza.

Por otro lado, la implementación de un mo-

delo basado en IA para la educación presenta ciertas limitaciones. Para empezar, en la actualidad no existe un consenso sobre los diferentes modelos basados en IA aprobados para su implementación en un sistema de entrenamiento estandarizado, por lo que su distribución y uso en grandes escalas todavía representa un reto⁴⁵⁻⁴⁷, aunque en general hay una actitud positiva de los cirujanos hacia la IA⁴⁸. Además, los métodos tradicionales para análisis de casos y transmisión de conocimiento pueden superar a los modelos de aprendizaje automático basados en la IA⁴⁹. Lo anterior se sustenta además en que el análisis de una situación en particular está condicionado por los datos previamente disponibles, por lo que se pueden presentar sesgos sistemáticos que modifiquen la solidez de determinada respuesta y/o conducta⁵⁰. También es importante mencionar la imposibilidad de los modelos basados en IA actuales para evaluar otras competencias cruciales como el trabajo en equipo interdisciplinario. Finalmente, se debe reconocer el valor de tener bases técnicas y no técnicas sólidas^{4,51,52}, ya que la pobre estandarización de dichos sistemas de análisis de datos puede verse reflejada en un error y tener consecuencias catastróficas³⁸.

Para concluir, el uso de la IA como herramienta para la adquisición de habilidades quirúrgicas está ganando popularidad en los últimos años, ya que ofrece retroalimentación personalizada con posibilidad de creación de estrategias que se enfoquen en la mejoría de aspectos débiles del sujeto, inmersión a partir de modelos 3D, facilidad en la planificación preoperatoria, mejoría del rendimiento frente a métodos tradicionales de tutoría, y optimización del tiempo necesario para obtener resultados satisfactorios, y en este sentido, es útil de muchas maneras. Sin embargo, es importante recalcar que presenta limitaciones considerables, como la falta de estandarización, la no superioridad con respecto a modelos de enseñanza tradicionales en situaciones particulares, y la necesidad de disponer una gran cantidad de datos sobre el caso que se va a tratar, para obtener una retroalimentación fehaciente y sólida. Todo ello evidencia la necesidad de realizar más estudios que evalúen los métodos tradicionales de aprendizaje y toma de decisiones, así como el impacto de los algoritmos basados en IA en la práctica quirúrgica a fin de proponer modelos futuros de aprendizaje que aprovechen al máximo los beneficios que esta herramienta ofrece y reduzcan las limitaciones que puedan surgir a partir de su uso, así como las repercusiones éticas, lo cual otorga un papel protagónico al Cirujano Profesor y revele cómo la IA sirva a su enseñanza como una herramienta y no como un objetivo.

Agradecimientos

A los estudiantes de GICx-UQ y a Andrés Felipe Barrios Puerta.

■ ENGLISH VERSION

Teaching surgery at the undergraduate and postgraduate levels is a complex area of medical education. It involves the interaction of scientific knowledge, technical and non-technical skills, theoretical and practical guidance, and the deliberate practice of the student. The experience of the professor is also important, as they can identify critical issues in a procedure and provide tips to their students¹⁻⁴. In this way, students can apply these tips to their individual medical practice, a delicate combination of art and science. Mentoring helps students to become professionals in the art of surgery⁵⁻⁸. This close relationship between professor and student meets academic and technical standards and involves a learning process similar to that of an apprentice learning from a craftsman. This process requires a high level of self-directed and deliberate scientific knowledge, supported by the development of motor skills with a phenomenological nuance^{9,10}.

Surgical education aims to shorten learning curves, improve decision-making, develop critical thinking and situational awareness, and enhance technical performance, ultimately leading to improved clinical outcomes. To attain this level of expertise, trainees must acquire skills following a model similar to that proposed by Dreyfus^{11,12}, in which the transition from novice to expert is achieved through formal training and skills in a system of deliberate practice¹³. Educational strategies such as simulation¹⁴⁻¹⁷ and new technologies like surgical training improved intraoperative performance, robotic surgery, and tele-coaching have emerged to allow real-time monitoring of events and anticipation to rethink the surgical approach or technical alternatives in situ.

Similarly, the use of artificial intelligence (AI) has grown exponentially. Optimizing the study of algorithms has made it possible to represent and improve various human cognitive processes, such as decision-making and problem-solving^{18,19}. The emergence of AI, computer vision, augmented reality, navigation, 3D visualization, and machine learning (ML) has led to their use as educational tools that facilitate multimodal analysis of technical, physiological, and functional performance²⁰⁻²².

All of this is achieved through a relationship between surgical education, innovation and technology, without losing sight of the ultimate goal: comprehensive student training and better clinical outcomes. As a result, its benefits have been harnessed in a wide range of fields, including medicine, to the extent that some experts claim that AI is transforming modern healthcare²³⁻²⁵. In the field of surgery, emerging technologies have the potential to improve the efficiency and outcomes of surgical treatments by collecting and processing large amounts of data. This information can be useful

throughout the patient's care, from initial consultation to postoperative management²⁶.

The use of AI is useful not only for experienced surgeons but also for surgical learning. It represents a significant improvement in the way surgical skills are acquired, allowing students to develop competencies in controlled and personalized environments that adapt to individual needs even from undergraduate medical training²⁷⁻²⁹. This technology improves accuracy, efficiency, and safety in clinical practice. The Global Surgical AI Collaborative reports that surgical procedures result in 3-5% of adverse events annually, 75% of which are preventable. This is part of what was reported in the publication *To Err is Human* which highlights healthcare-related events as the third leading cause of death in the United States. As a result, healthcare quality and patient safety policies have been revised³⁰. Therefore, the impact on medical education, especially surgical education in this case, is high²²; and in the case of middle- and low-income countries, it is a safe alternative. Depending on the strategy, it may be useful to train students, especially given the shortage of formally trained personnel³¹ and limited access to practice centers.

For instance, AI allows for personalized feedback and offers an immersive surgical experience for visualizing patient's anatomy³². It also facilitates surgical procedures of varying complexity, as well as robotic medicine³³, which is currently used in high-complexity centers. Academic planning should include AI in the curriculum in a structured and comprehensive way^{19,34-36}. This will allow students to receive synchronous and asynchronous feedback and advice in both simulated and real clinical scenarios.

This is where AI goes beyond technicality by using information collected through simulation recordings, intraoperative monitoring, and radiological images of the patient to facilitate data analysis. This provides valuable feedback and helps develop technologies for trainees in both simulated and real cases. Similarly, this information can be validated and structured for academic and clinical implementation. Inter-institutional networks can be established to reach consensus on the usefulness, applicability, and standardization of AI in transferring this data to surgical education, including evaluation and feedback between simulation and the operating room, such as the use of OSATS or the JIGSAWS database. In this way, AI can help eliminate biases in medical education³⁷. Beyond the fears that AI may raise, it is a new tool with the ability to integrate big data, recognize patterns, and create models to overcome human limitations, reduce medical burdens, expedite care, provide more personalized treatments, and optimize resources³⁸⁻⁴¹.

Although students are just entering the world

of surgery, the combination of traditional teaching with current technological tools represents a major step forward in terms of their education and future surgical performance. AI enables accurate education and information access by utilizing thousands of databases and reliable bibliographic sources. This empowers students to answer patients' questions and improve their confidence.

Professional training should take into account bioethical aspects related to AI, patient information, and imaging test results. It is important to maintain a balance between the use of AI and comprehensive medical education to prevent the dehumanization of medicine. In this sense, a major challenge is to incorporate professionalism, humanization, and empathy⁴² into AI in surgical education^{39,43}.

Fazlollahi et al.⁴⁴ conducted the first study comparing the effectiveness of AI tutoring systems with remote expert instruction and found better procedural performance during practice and on high-fidelity simulation scenarios when students were guided by an AI program. However, participants in the instructor group felt more relieved and relaxed during training compared to learners in the AI group, although there was no evidence of higher cognitive demands or poorer performance during the procedure⁴⁴. This AI intervention saved approximately 53 hours of expert supervision and formative assessment compared to the instructor group. Although the results were favorable for using AI as a learning method, most students indicated a preference for learning from both AI and traditional instruction. This shows how important it is to think of AI as an additional tool that does not completely replace the traditional methods of teaching.

On the other hand, the implementation of an AI-based model for education has certain limitations. First, there is currently no consensus on the various AI-based models that have been approved for implementation in a standardized training system. Therefore, their dissemination and large-scale use remain a challenge⁴⁵⁻⁴⁷ despite a generally positive

attitude toward AI among surgeons⁴⁸. Second, conventional teaching methods for case analysis and knowledge transfer may outperform machine learning models based on AI⁴⁹. This is further supported by the fact that the analysis of a situation is influenced by the previously available data; therefore, systematic biases may occur which can alter the robustness of a response or behavior⁵⁰. Third, current AI-based models cannot assess other critical competencies, such as interdisciplinary teamwork. Finally, it is important to recognize the value of having solid technical and non-technical foundations^{4,51,52}, as poor standardization of data analysis systems can lead to errors and have disastrous consequences³⁸.

In conclusion, the use of AI as a tool for surgical skill acquisition has become increasingly popular in recent years. Overall, AI is a useful tool in many ways. This model provides personalized feedback and allows for the creation of strategies to improve weak areas, as well as immersion from 3D models, ease of preoperative planning, improved performance compared to traditional tutoring methods, and optimization of the time needed to achieve satisfactory results. However, it is important to emphasize that it has significant limitations, such as non-standardization, lack of superiority over traditional teaching models in certain situations, and the need to count with a large dataset on the case to be treated in order to obtain reliable and solid feedback. All these considerations indicate the necessity for additional studies to assess conventional learning and decision-making methods, as well as the influence of AI-based algorithms in surgical practice. This will lead to the development of future learning models that fully utilize this tool and mitigate any limitations or ethical implications that may arise. It is important to note that AI should serve as a tool for teaching, rather than a goal, with the teaching surgeon playing a leading role.

Acknowledgments

To GIIcX-UQ students and Andrés Felipe Barrios Puerta.

Referencias bibliográficas /References

- Youngson GG. Teaching and assessing non-technical skills. Surgeon [Internet]. 2011;9(Suppl. 1): S35-7. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.surge.2010.11.004>
- Anderson C, Gupta R, Larson J. Impact of objectively assessing surgeons' teaching on effective perioperative instructional behaviors. JAMA Surg [Internet]. 2013;148(10):915-22. <http://dx.doi.org/10.1001/jamasurg.2013.2144>
- Min H, Morales DR, Orgill D, Smink DS, Yule S. Systematic review of coaching to enhance surgeons' operative performance. Surgery. 2015;158(5):1168-91.
- Yule S, Parker SH, Wilkinson J, McKinley A, MacDonald J, Neill A, et al. Coaching Non-technical Skills Improves Surgical Residents' Performance in a Simulated Operating Room. J Surg Educ. 2015;72(6):1124-30.
- Barr J, Graffeo CS. Procedural Experience and Confidence among Graduating Medical Students. J Surg Educ [Internet]. 2016;73(3):466-73. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsurg.2015.11.014>
- Trickey AW, Newcomb AB, Porrey M, Wright J, Bayless J, Piscitani F, et al. Assessment of Surgery Residents' Interpersonal Communication Skills: Validation Evidence for the Communication Assessment Tool in a Simulation Environment. J Surg Educ [Internet]. 2016;73(6): e19-27. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsurg.2016.04.016>
- Martimianakis MA, Michalec B, Lam J, Cartmill C, Taylor JS, Hafferty FW. Humanism, the hidden curriculum, and educational reform: A scoping review and thematic analysis. Acad Med. 2015;90(11): S5-13.
- O'Sullivan H, van Mook W, Fewtrell R, Wass V. Integrating professionalism into the curriculum: AMEE Guide No. 61. Med Teach. 2012; 34(2): e64-77.
- Alfageme-González MB, Díaz-Serrano J. Estilos de enseñanza: punto de partida de la identidad y el desarrollo profesional docente. Roteiro. 2020; 45:1-22.
- Planella J. Pedagogía y hermenéutica. Más allá de los datos en la

- educación. Rev Iberoam Educ [Internet]. 2001;36/12:12. <http://www.rieoei.org/deloslectores/1078Planella.PDF>
11. Tsuda S, Scott D, Doyle J, Jones DB. Surgical Skills Training and Simulation. *Curr Probl Surg*. 2009;46(4):271–370.
 12. Epstein RM. Assessment in Medical Education. *N Engl J Med*. 2007;356:387-96.
 13. Magas CP, Gruppen LD, Barrett M, Dedhia PH, Sandhu G. Intraoperative questioning to advance higher-order thinking. *Am J Surg*. 2017;213(2):222-6.
 14. Zigmont JJ, Kappus LJ, Sudikoff SN. Theoretical Foundations of Learning through Simulation. *Semin Perinatol* [Internet]. 2011;35(2):47–51. <http://dx.doi.org/10.1053/j.semperi.2011.01.002>
 15. McAnena PF, O'Halloran N, Moloney BM, Courtney D, Waldron RM, Flaherty G, et al. Undergraduate basic surgical skills education: impact on attitudes to a career in surgery and surgical skills acquisition. *Ir J Med Sci*. 2018;187(2):479-84.
 16. Kim S, Dunkin BJ, Paige JT, Eggerstedt JM, Nicholas C, Vassiliou MC, et al. What is the future of training in surgery? Needs assessment of national stakeholders. *Surg (United States)*. 2014;156(3):707-17.
 17. Dehabadi M, Fernando B, Berlingieri P. The use of simulation in the acquisition of laparoscopic suturing skills. *Int J Surg* [Internet]. 2014;12(4):258-68. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijso.2014.01.022>
 18. Davenport T, Kalakota R. The Potential for Artificial Intelligence in Healthcare. *Futur Healthc J*. 2019;6(2):94-8.
 19. Chan KS, Zary N. Applications and Challenges of Implementing Artificial Intelligence in Medical Education: Integrative Review. *JMIR Med Educ*. 2019;5(1):e13930.
 20. Bissonnette V, Mirchi N, Ledwos N, Alsidieri G, Winkler-Schwartz A, Del Maestro RF. Artificial Intelligence Distinguishes Surgical Training Levels in a Virtual Reality Spinal Task. *J Bone Jt Surg Am*. 2019;00(e1):1-8.
 21. Fazlollahi AM, Bakhaidar M, Alsayegh A, Yilmaz R, Winkler-Schwartz A, Mirchi N, et al. Effect of artificial intelligence tutoring vs expert instruction on learning simulated surgical skills among medical students a randomized clinical trial. *JAMA Netw Open*. 2022;5(2): e2149008.
 22. Guerrero DT, Asaad M, Rajesh A, Hassan A, Butler CE. Advancing Surgical Education: The Use of Artificial Intelligence in Surgical Training. *Am Surg*. 2023;89(1):49-54.
 23. Yu K-H, Beam AL, Kohane IS. Artificial intelligence in healthcare. *Nat Biomed Eng*. 2018;2: 719-31.
 24. Kavian JA, Wilkey HL, Patel PA, Boyd CJ. Harvesting the Power of Artificial Intelligence for Surgery: Uses, Implications, and Ethical Considerations. *Am Surg*. 2023;1–3.
 25. Petrone P. Artificial intelligence and artificial neural networks. *Rev Colomb Cir*. 2023;38(3):407-12.
 26. Pucchio A, Rathagirisnhan R, Caton N, Garicsak PJ, Del Papa J, Nabhen JJ, et al. Exploration of exposure to artificial intelligence in undergraduate medical education: a Canadian cross-sectional mixed-methods study. *BMC Med Educ*. 2022;22(1):815.
 27. Liu P ran, Lu L, Zhang J yao, Huo T tong, Liu S xiang, Ye Z wei. Application of Artificial Intelligence in Medicine: An Overview. *Curr Med Sci*. 2021;41(6):1105-15.
 28. Masters K. Artificial intelligence in medical education. *Med Teach*. 2019;41(9):976-80.
 29. Park JJ, Tiefenbach J, Demetriades AK. The role of artificial intelligence in surgical simulation. *Front Med Technol*. 2022;4(December):1076755.
 30. Kohn LT, Corrigan JM, Donaldson MS. To Err Is Human [Internet]. Vol. 126, Committee on Quality of Health Care in America; Institute of Medicine. 1999. http://www.journals.cambridge.org/abstract_S095026880100509X
 31. Bhatia MB, Namazi B, Matthews J, Thomas C, Doster D, Martinez C, et al. Use of artificial intelligence to support surgical education personnel shortages in low- and middle-income countries: developing a safer surgeon. *Glob Surg Educ-J Assoc Surg Educ* [Internet]. 2023;2(1):1-8. <https://doi.org/10.1007/s44186-023-00142-4>
 32. Siyar S, Azarnoush H, Rashidi S, Del Maestro RF. Tremor Assessment during Virtual Reality Brain Tumor Resection. *J Surg Educ*. 2020;77(3):643-51.
 33. Palomares Orihuela RJ. Robot Da Vinci: El quirófano del futuro. *Perfiles Ing*. 2016;2(11):155–62.
 34. Crispin M. Artificial Intelligence in Surgical Education and Training. *Clin Educ Health Prof*. 2021;1-11.
 35. Sun L, Yin C, Xu Q, Zhao W. Artificial intelligence for healthcare and medical education: a systematic review. *Am J Transl Res*. 2023;15(7):4820-8.
 36. Bilgic E, Gorgy A, Yang A, Cwintal M, Ranjbar H, Kahla K, et al. Exploring the roles of artificial intelligence in surgical education: A scoping review. *Am J Surg* [Internet]. 2022;224(1):205-16. <https://doi.org/10.1016/j.amjsurg.2021.11.023>
 37. Kirubarajan A, Young D, Khan S, Crasto N, Sobel M, Sussman D. Artificial Intelligence and Surgical Education: A Systematic Scoping Review of Interventions. *J Surg Educ* [Internet]. 2021;79(2):500-15. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2021.09.012>
 38. Álvarez Vega M, Quirós Mora LM, Cortés Badilla MV. Inteligencia artificial y aprendizaje automático en medicina. *Rev Médica Sinerg*. 2020;5(8):e557.
 39. Caparrós Galán G, Sendra Portero F. Percepciones de estudiantes de Medicina sobre el impacto de la inteligencia artificial en radiología. *Radiología*. 2022;64(6):516-24.
 40. Kiyasseh D, Laca J, Haque TF, Miles BJ, Wagner C, Donoho DA, et al. A multi-institutional study using artificial intelligence to provide reliable and fair feedback to surgeons. *Commun Med*. 2023;3(1):1–12.
 41. Mirchi N, Bissonnette V, Yilmaz R, Ledwos N, Winkler-Schwartz A, Del Maestro RF. The virtual operative assistant: An explainable artificial intelligence tool for simulation-based training in surgery and medicine. *PLoS One* [Internet]. 2020;15(2):1-15. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0229596>
 42. West E, Singer-Chang G, Ryznar R, Ross D, Czekajlo M, Hoang T, et al. The Effect of Hyper-Realistic Trauma Training on Emotional Intelligence in Second Year Military Medical Students. *J Surg Educ* [Internet]. 2020;77(6):1422-8. <https://doi.org/10.1016/j.jsurg.2020.04.020>
 43. Kobus V, Calletti MJ, Santander J. Prevalencia de síntomas depresivos, síntomas ansiosos y riesgo de suicidio en estudiantes de medicina de la Pontificia Universidad Católica de Chile. *Rev Chil Neuropsiquiatr* [Internet]. 2020;58(4):314-23www.sonepsyn.cl
 44. Austin PC, Tu J V, Lee DS. Logistic regression had superior performance compared with regression trees for predicting in-hospital mortality in patients hospitalized with heart failure. *J Clin Epidemiol* [Internet]. 2010;63(10):1145-55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclinepi.2009.12.004>
 45. Buckley CE, Kavanagh DO, Traynor O, Neary PC. Is the skillset obtained in surgical simulation transferable to the operating theatre? *Am J Surg* [Internet]. 2014;207(1):146-57. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.amjsurg.2013.06.017>
 46. Traynor OJ, O'Connell PR. The Past, Present and Future of Surgical Education in Ireland. *Indian J Surg* [Internet]. 2022;84(Suppl 1):S147-52. Available from: <https://doi.org/10.1007/s12262-021-02988-8>.
 47. Dumon KR, Traynor O, Broos P, Gruwez JA, Darzi AW, Williams NN. Surgical education in the new millennium: the European perspective. *Surg Clin North Am*. 2004; 84: 1471-91.
 48. Voskens FJ, Abbing JR, Ruys AT, Ruurda JP, Broeders IAMJ. A nationwide survey on the perceptions of general surgeons on artificial intelligence. *Artif Intell Surg*. 2022;2: 8-17.
 49. Pakkasjärvi N, Luthra T, Anand S. Artificial Intelligence in Surgical Learning. *Surgeries (Switzerland)*. 2023;4(1):86–97.
 50. Capelli G, Verdi D, Frigerio I, Rashidian N, Ficoirilli A, et al. White paper: ethics and trustworthiness of artificial intelligence in clinical surgery. *Artif Intell Surg*. 2023;3(2):111-22.
 51. Navarro F, González S, Gabrielli M. Evaluación de las habilidades no técnicas en cirugía. *Rev Cir (Mex)*. 2019;71(4):359-65.
 52. Alvarado IJ, Henríquez RJP, Castillo RR, Sosa BJ, León FF, Varas CJ, et al. Programa Pionero de Simulación en Sutura para Estudiantes de Medicina de Pregrado. *Rev Chil Cirugía*. 2015;67(5):480-5.