

## LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN ONCOLOGÍA: CONTEXTO ACTUAL Y UNA VISIÓN HACIA LA PRÓXIMA DÉCADA

---

Arturo Loaiza-Bonilla<sup>1</sup>

### Resumen

La inteligencia artificial (IA) ha contribuido sustancialmente a la resolución de una variedad de problemas biomédicos, incluido diversos eventos relacionados con el cáncer. El aprendizaje profundo (deep learning), un subcampo de la IA que es altamente flexible y admite la extracción automática de características, y se aplica cada vez más en diversas áreas de la investigación del cáncer tanto básica como clínica. En esta revisión, se describen numerosos ejemplos recientes sobre la aplicación de la IA en oncología, incluidos casos en los que el aprendizaje profundo ha resuelto de manera eficiente conflictos no resueltos. También se abordan los obstáculos que deben superarse antes de que dicha aplicación pueda generalizarse. De igual forma, se destacan los recursos y conjuntos de datos que pueden ayudar a aprovechar el poder de la IA dirigida a la investigación. El desarrollo de enfoques y aplicaciones innovadores de la IA generará conocimientos importantes en oncología que permitirán modificar ampliamente la práctica clínica.

**Palabras clave:** *Inteligencia artificial, aprendizaje profundo, aprendizaje automático, oncología, medicina personalizada.*

---

<sup>1</sup> MD, MEd, FACP. Oncólogo médico. Coordinador del Programa Nacional Neoplasias Gastrointestinales y Director Médico de Investigación Clínica en Cáncer. Treatment Centers of America, Comprehensive Care and Research Center, Atlanta y cofundador de Massive Bio, Nueva York.

## ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ONCOLOGY: CURRENT CONTEXT AND A VISION FOR THE NEXT DECADE

### Abstract

Artificial intelligence (AI) has contributed substantially to the resolution of various biomedical problems, including various cancer-related events. Deep learning, a highly flexible subfield of AI that supports automatic feature extraction, is increasingly being applied in various areas of both basic and clinical cancer research. This review describes numerous recent examples of the application of AI in oncology, including cases where deep learning has efficiently resolved unresolved conflicts. Obstacles that must be overcome before such an application can be generalized are also addressed. Likewise, it highlights resources and data sets that can help harness the power of research-driven AI. The development of innovative approaches and applications of AI will generate essential insights in oncology that will allow comprehensive modification of clinical practice.

**Keywords:** *Artificial intelligence, deep learning, machine learning, oncology, personalized medicine.*

El campo de la oncología hoy en día ha experimentado dos de las mayores evoluciones tecnológicas: la “ómica” molecular (genómica, proteómica, epigenómica) y el “big data”, que analiza grandes bases de datos combinando biomarcadores y tendencias poblacionales para generar conocimiento en tiempo real. Hace un par de décadas el cáncer se diagnosticaba mediante una combinación de imágenes de rayos X y pruebas de histopatología. En contraste, las pruebas moleculares ahora pueden informar sobre los cambios en cientos de genes y proteínas para diagnosticar y determinar el pronóstico y tratamiento del cáncer en un individuo. El tratamiento del cáncer ha evolucionado de manera similar, donde agentes citotóxicos se han reemplazado o modificado para dar lugar a planes de tratamiento y terapias agnósticas de histología o tumor de origen y, a menudo, dirigidos a biomarcadores presentes en el tumor, las vías de señalización involucradas en el crecimiento del cáncer, o modulando el sistema inmu-

nológico del paciente para atacar la enfermedad (por ejemplo, los inhibidores ‘checkpoint’).

De hecho, estos avances están extendiendo la supervivencia y mejorando la calidad de vida de cientos de miles de pacientes. Sin embargo, los profesionales de salud enfrentan nuevos desafíos asociados con la implementación de la medicina de precisión, particularmente porque el crecimiento del conocimiento médico es exponencial y se requiere especialización constante para brindar atención oncológica altamente individualizada. Este debate no es único de países altamente desarrollados. Brindar atención integral y de vanguardia contra el cáncer a millones de pacientes sigue siendo un desafío significativo, particularmente para las poblaciones suburbanas y rurales. Los datos biomédicos son heterogéneos y difíciles de clasificar (por ejemplo, alta dimensionalidad, dependencia temporal, paridad, irregularidad) para aplicaciones de In-

teligencia Artificial. (1-3). Aún no se han desarrollado enfoques optimizados para estructurar y estandarizar información dispar específica del paciente (por ejemplo, texto narrativo en historias clínicas de pacientes y notas clínicas, exploraciones radiológicas, datos de laboratorio, información genómica, farmacogenómica y listas de medicamentos).

Estos desafíos se complican aún más por varias ontologías médicas utilizadas para generalizar los datos (por ejemplo, SNOMED-CT, UMLS, ICD-9, ICD-10), introduciendo conflictos e inconsistencias (4). Además, es necesario desarrollar sistemas de apoyo educativos y de gestión de casos para garantizar que la información integral y basada en la evidencia generada a partir de la tecnología de aprendizaje automatizado sea realmente procesable para todos los pacientes. Las soluciones potenciales radican en el uso efectivo de sistemas electrónicos integrales de información de salud, incluidos datos del mundo real, para guiar el proceso de toma de decisiones clínicas.

El término inteligencia artificial (IA) surgió en 1956, y desde entonces, la IA ha progresado enormemente. Los primeros avances en IA se centraron en la construcción de redes neuronales ('neural networks'), modelados según la capacidad del cerebro humano de tomar decisiones a partir de los datos dados. Alrededor de la década de 1980, estas redes neuronales artificiales progresaron hasta un punto en el que el "aprendizaje automático" se hizo popular. El aprendizaje automático ('machine learning') se refiere a la capacidad de una máquina para revisar datos y encontrar patrones, aprendiendo así de los datos y luego aplicándolos a los problemas para tomar decisiones informadas, en un proceso de optimización continua.

Después vino la tendencia del aprendizaje profundo ('deep learning'), que es un subconjunto más sofisticado del aprendizaje automático, que no requiere intervención humana para que la máquina progrese,

deduciendo si han hecho buenas predicciones por su cuenta y continuar el proceso de aprendizaje de estas deducciones. Las máquinas de IA de hoy en día utilizan una mezcla de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, y estas máquinas se pueden aplicar a una amplia gama de disciplinas, entre estas la oncología. Un estudio reciente realizado por *MIT Technology Review* y GE Healthcare descubrió que el 79% de los clínicos creen que las herramientas de IA han ayudado a optimizar procesos, lo que permite a los profesionales brindar una atención más centrada en el paciente ([www.technologyreview.com/hub/ai-effect/](http://www.technologyreview.com/hub/ai-effect/)).

Los beneficios potenciales clave del uso de tecnología habilitada para IA y respaldar las decisiones clínicas en oncología incluyen:

- Diagnóstico automatizado de cáncer
- Capacidades de predicción mejoradas,
- Actualizaciones de datos en tiempo real,
- Atención personalizada,
- Mejores resultados, y
- Aumento de la eficiencia, mejora de resultados y reducción de los costos.

Por lo tanto, la aplicación de la IA y el aprendizaje automatizado como tecnologías fundamentales y habilitadoras para ayudar al oncólogo tratante, son prometedoras para mejorar la atención del cáncer. A través del desarrollo continuo de sistemas escalables de aprendizaje profundo, los médicos pueden implementar de manera más libre y eficiente la medicina basada en resultados.

## IA en la detección y el diagnóstico del cáncer

Los algoritmos basados en IA representan una vía prometedora para mejorar simultáneamente la precisión de imágenes diagnósticas, así como para ayudar a los radiólogos, proporcionándoles tiempo para centrarse

en la atención al paciente. Un estudio publicado en *Academic Radiology* mostró que un radiólogo promedio debe interpretar una imagen cada 3-4 segundos para mantener el ritmo de trabajo diario (5). Los componentes de IA en radiología y análisis de imágenes impulsarían una mayor eficiencia este campo, al generar acceso a una mayor cantidad de datos que sus contrapartes humanas. Investigadores de todo el mundo están desarrollando formas de detectar y diagnosticar el cáncer de mama, pulmonar, cáncer colorrectal, próstata y los tumores de cabeza y cuello, por nombrar algunos. Dadas las crecientes tasas de investigación en este campo, parece que el potencial de la IA en oncología es enorme.

La mamografía ha sido la herramienta de detección de primera línea para el cáncer de mama durante décadas, con más de 200 millones de mujeres examinadas cada año. A pesar de su uso generalizado, la interpretación de las mamografías se ve afectada por altas tasas de falsos positivos y falsos negativos. Por ejemplo, en los Estados Unidos, aproximadamente el 10% de los 40 millones de mujeres que se someten a esta prueba anualmente requieren imágenes diagnósticas adicionales, y solo el 4,5% de estas mujeres son finalmente diagnosticadas. Esto significa que más de medio millón no tendría que someterse a un procedimiento diagnóstico innecesario.

Google, en conjunto con dos centros de detección en el Reino Unido (25.856 mujeres) y Estados Unidos (3.097 mujeres) (6) utilizó un sistema para identificar la presencia de cáncer de mama en las mamografías de mujeres con diagnóstico de cáncer de mama probado por biopsia o resultados normales de imágenes de seguimiento al menos 365 días después. Estas predicciones se compararon con aquellas de la práctica clínica, recopiladas por seis radiólogos en un estudio independiente. Los autores proporcionaron evidencia de que el sistema de IA superó tanto las decisiones históricas tomadas por los radiólogos que inicialmente evaluaron las mamografías, como las

decisiones de seis radiólogos expertos que analizaron 500 casos seleccionados al azar en un estudio controlado. Los hallazgos revelaron una reducción absoluta de 5,7% y 1,2% (Estados Unidos y Reino Unido) en falsos positivos y 9,4% y 2,7% en falsos negativos. A pesar de ser un estudio preliminar, los hallazgos del sistema de IA allanan el camino para que los ensayos clínicos mejoren la precisión y la eficiencia de la detección del cáncer de mama usando tecnología digital.

En un esfuerzo por mostrar los beneficios del uso simultáneo de la nueva IA junto con radiólogos, se evaluó el sistema MammoScreen, una herramienta diseñada para identificar regiones sospechosas de tener un cáncer de mama en mamografías 2D y evaluar su probabilidad de malignidad (7). Los criterios de valoración evaluados por los investigadores incluyeron el área bajo la curva ROC (área bajo la curva [AUC]), sensibilidad, especificidad y el tiempo de lectura. Los hallazgos demostraron que, en general, el AUC promedio entre los lectores fue de 0,769 (IC 95%, 0,724-0,814) sin el uso de IA y de 0,797 (IC 95%, 0,754-0,840) con IA. La diferencia media en el AUC fue de 0,028 (IC 95%, 0,002-0,055;  $P=0,035$ ). Para 11 de 14 radiólogos, MammoScreen demostró una tendencia hacia la reducción de la tasa de falsos negativos con una mejora promedio del 18%, y la tasa de falsos positivos se redujo en un promedio del 25% para ocho radiólogos, lo que concluyó en resultados más estandarizados. En marzo del 2020, la Administración de Alimentos y Medicamentos de los Estados Unidos (FDA) autorizó MammoScreen (8).

Como ejemplo adicional, un algoritmo de aprendizaje profundo, en Visión por Computadora, usando 1.000 tomografías computarizadas con IA para enseñarle cómo analizar el tejido pulmonar en busca de anomalías, encontró que la IA podría identificar el cáncer de pulmón con un 30% más de precisión que los humanos (9). Estos estudios destacan el potencial de las tecnologías de IA para detectar y mejorar la preci-

sión de las pruebas de detección del cáncer cuando se combinan con evaluaciones de radiólogos humanos. Las tecnologías de IA fueron capaces de detectar cambios a nivel de píxel en el tejido invisible para el ojo humano, mientras que los humanos utilizaron formas de razonamiento no disponibles para la IA. El objetivo final será encontrar la mejor manera de combinar los dos para transformar el futuro de la radiología.

## Patología Digital y la IA

En septiembre 21 de 2021, la FDA autorizó la comercialización de software para ayudar a patólogos en la detección de áreas sospechosas de cáncer como un complemento a la revisión de imágenes de placas o diapositivas de histología de biopsias de próstata, escaneadas digitalmente (10). El software, llamado Paige Prostate, es el primer software basado en IA, diseñado para identificar en la imagen de biopsia de próstata un área de interés con la mayor probabilidad de albergar cáncer, para que pueda ser revisada más a fondo por el patólogo si dicha área no se había identificado.

La FDA evaluó los datos de un estudio clínico en el que 16 patólogos examinaron 527 imágenes de biopsias de próstata (171 de cáncer y 356 benignas) que se digitalizaron utilizando un escáner. Para cada imagen un patólogo completó dos evaluaciones, una sin la asistencia de Paige Prostate (lectura no asistida) y otra con la asistencia de Paige Prostate (lectura asistida). El estudio encontró que Paige Prostate mejoró la detección del cáncer en imágenes de diapositivas individuales en un 7,3% en promedio en comparación con las lecturas no ayudadas de los patólogos para imágenes de diapositivas completas de biopsias individuales, sin impacto en la lectura de imágenes de diapositivas benignas. Los riesgos potenciales incluyen resultados falsos negativos y falsos positivos, que se mitigan por el uso del dispositivo como complemento y por la evaluación profesional por un patólogo calificado que tiene en cuenta el historial del paciente entre otra información clínica relevante, y

que puede realizar estudios de laboratorio adicionales en las muestras antes de realizar un diagnóstico final.

Hallazgos presentados en la Sociedad Europea de Oncología Médica (ESMO) en 2021 del estudio RACE AI como parte del AI for Health Challenge organizado por la Región de Ile-de-France en 2019 demostró que el análisis de aprendizaje profundo aplicado a patologías digitalizadas puede clasificar a las pacientes con cáncer de mama localizado entre alto riesgo y bajo riesgo de recaída metastásica a cinco años, capaz de evaluar de manera confiable el riesgo de recaída con un AUC del 81% para determinar el beneficio/riesgo de la quimioterapia. Esta IA podría convertirse en una ayuda para la toma de decisiones terapéuticas en adyuvancia (11).

## Uso de la inteligencia artificial para detectar cambios moleculares en tumores

En un estudio considerado el análisis pan-cancerígeno más extenso en entrenar la visión por computadora combinada con patología digital, investigadores del Reino Unido encontraron que un algoritmo podría distinguir entre tejidos cancerosos y no cancerosos, así como identificar patrones genómicos aberrantes específicos en 28 tipos diferentes de cáncer, desde mutaciones puntuales en genes canónicos hasta variaciones de número de copias y duplicaciones del genoma (12).

Reutilizando un algoritmo desarrollado por Google en 2016 para identificar objetos cotidianos de Internet, se analizaron diapositivas de tejido fresco congelado recolectadas del Atlas del Genoma del Cáncer (TCGA en inglés) en 10.452 individuos con cáncer, mientras que 14 muestras de tejido normal sin alteraciones genómicas sirvieron como control del estudio. El algoritmo identificó con precisión más de 160 patrones de ADN y miles de cambios de ARN en tumores, así como el número y la ubicación espacial de los linfocitos infiltrantes de tumo-

res (TIL) en los 28 tipos de cáncer. El hallazgo de los TILs podría mejorar la comprensión del microambiente tumoral como factor predictivo de la inmunoterapia y terapias dirigidas. Aunque promisorio, esta IA requeriría que los investigadores pasen a los tejidos fijados con parafina, ya que el tejido fresco congelado no está disponible en el 99% de los pacientes con cáncer.

Un ejemplo promisorio del uso de IA para descubrimientos terapéuticos es el sistema AlphaFold (13) de Google DeepMind, que demostró cómo la investigación en IA puede impulsar y acelerar nuevos desarrollos en los campos de la biología estructural, la física y el aprendizaje automático al predecir la estructura 3D de una proteína basándose únicamente en su secuencia genética, y los modelos 3D de proteínas que genera AlphaFold son mucho más precisos. Las proteínas pueden variar en su función basado en su estructura 3D única, se pliegan espontáneamente, en milisegundos, y su secuencia genética no se traduce en conocimiento de su forma. Cuanto más grande es la proteína, más difícil es modelarla, debido a interacciones entre aminoácidos. Este “problema del plegamiento de proteínas”, ha inspirado innumerables desarrollos, desde estimular los esfuerzos de IBM en supercomputación (BlueGene) nuevas iniciativas (Folding@Home y FoldIt) y campos de ingeniería, como el diseño racional de proteínas. Estos métodos basados en redes neuronales profundas (deep neural networks) pueden contribuir al descubrimiento de fármacos y reducir costos de experimentación.

Por ejemplo, un algoritmo de IA puede buscar biomarcadores y predecir si es probable que un medicamento reciba la aprobación de la FDA, superando modelos endogámicos preclínicos que tienden a predecir pobremente el éxito de un estudio clínico (14). La IA podría reemplazar el primer y último paso en el descubrimiento preclínico de fármacos, como lo sugiere el modelo iNetMed. El brazo computacional de iNetMed modela una enfermedad utilizando un mapa de cambios suce-

sivos en la expresión génica con el uso de precisión matemática para reconocer patrones de dicha expresión, luego usa en un ensayo clínico de Fase “0” basado en un biobanco vivo de organoides, el brazo traslacional de iNetMed. Este enfoque podría cambiar de manera mensurable la forma en que los investigadores analizan ‘big data’ para encontrar información significativa con gran beneficio para los pacientes, la industria farmacéutica y los sistemas de atención médica.

## IA para optimizar tratamientos

Una herramienta de IA diseñada por un equipo de la Universidad de Toronto ha demostrado ser prometedora en la reducción del tiempo para adaptar los planes de tratamiento de radiación a pacientes individuales (15). Esta IA en particular utilizó datos históricos de radiación para recomendar estrategias de tratamiento, con éxito comparable a los especialistas de radiación oncológica. En 20 minutos, la IA del equipo de Toronto pudo replicar los complejos planes de tratamiento a los que llegaron los mejores especialistas tras varios días de trabajo, optimizando la planificación del tratamiento de radioterapia.

Aplicando algoritmos de “aprendizaje automático” de IA modelados en redes neuronales convolucionales (CNN), diseñadas para imitar las redes neuronales en la corteza cerebral que nos permiten tomar “atajos” en nuestro pensamiento para hacer ideas racionales sin esfuerzos no lineales “enrevesados”, en un proceso conocido como “salto” neuronal, podemos facilitar la diferenciación para asignar importancia a las áreas de una imagen. En un estudio del 2021, los investigadores probaron su hipótesis de que el estado de expresión de proteína del ligando de muerte programada-1 (PD-L1) y la presencia de mutaciones del factor de crecimiento epidérmico (EGFR) en 837 pacientes con NSCLC podría capturarse mediante el análisis de imágenes PET/CT 18F-FDG con estos algoritmos, lo cual podría sugerir recomendaciones en tiempo real del uso de in-

hibidores de la tirosina quinasa (TKIs) o inhibidores checkpoint (ICI) (16). Puntuaciones de aprendizaje profundo para EGFR y PD-L1 generadas (EGFR-DLS y PDL1-DLS) de los modelos CNN se asociaron con una alta precisión en la predicción del estado de mutación del EGFR con valores bajo la curva de 0,86 y 0,83, y 0,81 y discriminación del estado de PD-L1 positivo con valores bajo la curva de 0,89, 0,84 y 0,82 para cohortes de entrenamiento, validación y prueba externa, respectivamente. Pacientes con puntuaciones altas se asociaron además con la supervivencia libre de progresión (SLP) en 67 pacientes tratados con TKI y 149 pacientes tratados con ICI.

En la actualidad, el uso más relevante de la IA en la práctica clínica oncológica consiste en combinar la guía proveniente del aprendizaje profundo con supervisión humana y operacionalización de dichas recomendaciones por el personal de salud. En un estudio realizado por Massive Bio (New York), se demostró la viabilidad, reproducibilidad, escalabilidad y beneficios de una junta de tumores virtual basada en aprendizaje profundo (DLVTB) en una cohorte de 35 pacientes con adenocarcinoma colorrectal (CCR) avanzado (17). Utilizando lenguaje natural basado en el aprendizaje profundo, la cohorte DLVTB demostró un aumento en la mediana de supervivencia general de 12 meses por paciente en comparación con datos históricos. Además de recomendar pruebas de biomarcadores en el 71% de los pacientes, señaló un tratamiento de oncología de precisión en 80% de los pacientes. Sesenta y tres por ciento de los pacientes fueron elegibles para al menos un ensayo clínico, superando con creces el promedio nacional (3%). El futuro de estos desarrollos depende de la colaboración, y desde entonces se inició SYNERGY-AI (<https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03452774>), un registro abierto y descentralizado que puede acelerar estos esfuerzos de manera global y a escala para pacientes con cáncer, y acceder a ensayos clínicos utilizando IA. Este sistema de IA de Massive Bio ya está siendo im-

plementado en los centros de cáncer designados por el Instituto Nacional de Cancerología de los Estados Unidos (18).

## Conclusiones

La integración multimodal de diagnósticos moleculares avanzados, imágenes radiológicas e histológicas y datos clínicos codificados, presenta oportunidades para avanzar en la oncología de precisión más allá de la genómica y las técnicas moleculares estándar (19). Sin embargo, la mayoría de los conjuntos de datos médicos todavía son demasiado escasos para ser útiles en el entrenamiento de técnicas modernas de aprendizaje automático, y quedan desafíos importantes antes de que se solucione. Para el éxito se requieren esfuerzos combinados de ingeniería de datos, métodos computacionales para el análisis de datos heterogéneos y la instanciación de modelos de datos sinérgicos en la investigación biomédica. El futuro es muy promisorio, y en países como Colombia donde hay un sistema único de salud, existe una oportunidad excepcional en la implementación de la IA y el 'big data', atrayendo la inversión en estudios clínicos y desarrollo bioinformático y de nuevos terapéuticos. De nosotros depende utilizar este potencial al máximo en la próxima década.

## Referencias

1. Hripscak G, Albers DJ. Next-generation phenotyping of electronic health records. *J Am Med Inform Assoc.* 2013 Jan 1;20(1):117-21. doi: 10.1136/amiajnl-2012-001145. Epub 2012 Sep 6.
2. Jensen PB, Jensen LJ, Brunak S. Mining electronic health records: towards better research applications and clinical care. *Nat Rev Genet.* 2012 May 2;13(6):395-405. doi: 10.1038/nrg3208.
3. Luo J, Wu M, Gopukumar D, Zhao Y. Big Data Application in Biomedical Research and Health Care: A Literature Review. *Biomed Informat Perspect.* 2016;S31559. Luo J, Wu M, Gopukumar D, Zhao Y. Big Data Application in Biomedical Research and Health Care: A Literature Review. *Biomed Informat Perspect.* 2016;S31559.

4. Miotto R, Wang F, Wang S, Jiang X, Dudley JT. Deep learning for healthcare: review, opportunities and challenges. *Brief Bioinform*. 2018 Nov 27;19(6):1236-1246. doi: 10.1093/bib/bbx044.
5. McDonald RJ, Schwartz KM, Eckel LJ, Diehn FE, Hunt CH, Bartholmai BJ, et al. The effects of changes in utilization and technological advancements of cross-sectional imaging on radiologist workload. *Acad Radiol*. 2015 Sep;22(9):1191-8. doi: 10.1016/j.acra.2015.05.007. Epub 2015 Jul 22.
6. McKinney SM, Sieniek M, Godbole V, Godwin J, Antropova N, Ashrafian H, et al. International evaluation of an AI system for breast cancer screening. *Nature*. 2020 Jan;577(7788):89-94. doi: 10.1038/s41586-019-1799-6. Epub 2020 Jan 1.
7. Pacilè S, Lopez J, Chone P, Bertinotti T, Grouin JM, Fillard P. Improving Breast Cancer Detection Accuracy of Mammography with the Concurrent Use of an Artificial Intelligence Tool. *Radiol Artif Intell*. 2020 Nov 4;2(6):e190208. doi: 10.1148/ryai.2020190208.
8. PRNewswire. Therapixel receives FDA 510(k) clearance for MammoScreen™. [Internet]. [Consultado el 11 Oct 2021]. Disponible en: <https://www.prnewswire.com/news-releases/therapixel-receives-fda-510k-clearance-for-mammoscreen-301090534.html>.
9. Khosravan N., Bagci U. (2018) S4ND: Single-Shot Single-Scale Lung Nodule Detection. In: Frangi A., Schnabel J., Davatzikos C., Alberola-López C., Fichtinger G. (eds) *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention – MICCAI 2018*. MICCAI 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol 11071. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00934-2\\_88](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00934-2_88).
10. FDA. FDA Authorizes Software that Can Help Identify Prostate Cancer. [Internet]. [Consultado el 11 Oct 2021]. Disponible en: <https://www.fda.gov/news-events/press-announcements/fda-authorizes-software-can-help-identify-prostate-cancer>.
11. Garberis IJ, Saillard C, Drubay D, et al. Prediction of distant relapse in patients with invasive breast cancer from deep learning models applied to digital pathology slides. *ESMO Congress 2021* (16-21 September).
12. Fu Y, Jung AW, Torne RV. Pan-cancer computational histopathology reveals mutations, tumor composition and prognosis. *Nat Cancer*. 2020;1:800–810. doi: 10.1038/s43018-020-0085-8.
13. Senior AW, Evans R, Jumper J, Kirkpatrick J, Sifre L, Green T, et al. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature*. 2020 Jan;577(7792):706-710. doi: 10.1038/s41586-019-1923-7. Epub 2020 Jan 15. P.
14. Sahoo D, Swanson L, Sayed IM, Katkar GD, Ibeawuchi SR, Mittal Y, et al. Artificial intelligence guided discovery of a barrier-protective therapy in inflammatory bowel disease. *Nat Commun*. 2021 Jul 12;12(1):4246. doi: 10.1038/s41467-021-24470-5.
15. Mahmood R, Babier A, McNiven ALL, Diamant A, Chan TCY. "Automated treatment planning in radiation therapy using generative adversarial networks," *Proceedings of Machine Learning Research*, Vol. 85 (Machine Learning for Healthcare), pp. 484-499, 2018.
16. Mu W, Jiang L, Zhang J, Shi Y, Gray JE, Zhao X, et al. Radiomics and AI-based treatment decision support for non-small cell lung cancer [abstract]. In: *Proceedings of the AACR Virtual Special Conference on Artificial Intelligence, Diagnosis, and Imaging; 2021 Jan 13-14*. Philadelphia (PA): AACR; *Clin Cancer Res* 2021;27(5\_Suppl):Abstract nr PR-03.
17. Desai A, Loaiza-Bonilla A, Culcuoglu A, Johnston C, Kurnaz, S. Outcomes and applicability of a deep learning virtual tumor board (DLVTB) in community-dwelling colorectal cancer (CRC) patients. *Journal of Clinical Oncology* 39, no. 15\_suppl (2021), [https://doi.org/10.1200/JCO.2021.39.15\\_suppl.e18635](https://doi.org/10.1200/JCO.2021.39.15_suppl.e18635).
18. U.S. National Library of Medicine. SYNERGY-AI: Artificial Intelligence Based Precision Oncology Clinical Trial Matching and Registry. [Internet]. [Consultado el 11 Oct 2021]. Disponible en: <https://clinicaltrials.gov/ct2/show/NCT03452774>.
19. Boehm KM, Khosravi P, Vanguri R, Gao J, Shah SP. Harnessing multimodal data integration to advance precision oncology. *Nat Rev Cancer*. 2021 Oct 18. doi: 10.1038/s41568-021-00408-3. Epub ahead of print.

**Recibido:** 12 de noviembre de 2021

**Aceptado:** 22 de noviembre de 2021

**Correspondencia:**

Arturo Loaiza Bonilla

[Arturo.Loaiza-Bonilla@ctca-health.com](mailto:Arturo.Loaiza-Bonilla@ctca-health.com)