



Informes Anticipando  
APLICACIONES DE LA  
**INTELIGENCIA  
ARTIFICIAL**  
EN MEDICINA  
PERSONALIZADA DE PRECISIÓN





### **Informe Anticipando coordinado por:**

#### **Víctor Maojo**

*Catedrático de Inteligencia Artificial.  
Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad Politécnica de Madrid.*



### **Expertos colaboradores:**

#### **Joaquín Dopazo**

*Director de la Plataforma de Medicina Computacional de la Fundación Progreso y Salud.  
Instituto de Biomedicina de Sevilla. Hospital Virgen del Rocío, Sevilla.*

#### **Xavier Pastor Durán**

*Jefe de Informática Clínica del Hospital Clínic de Barcelona.  
Profesor Titular de la Universidad de Barcelona.*

#### **Alejandro Pazos Sierra**

*Catedrático del Área de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial en la Universidade da Coruña.  
Miembro del Instituto de Investigación Biomédica de A Coruña.*



### **Comité Asesor del Observatorio de Tendencias en la Medicina del Futuro:**

#### **Joaquín Arenas**

*Director del Instituto de Investigación del Hospital Universitario 12 de Octubre.*

#### **Ángel Carracedo**

*Director de la Fundación Pública Gallega de Medicina Genómica (Servicio Gallego de Salud)  
y Coordinador del Grupo de Medicina Genómica de la Universidad de Santiago de Compostela.*

#### **Pablo Lapunzina**

*Jefe de grupo de investigación del Instituto de Genética Médica y Molecular del IdiPaz  
y director científico del CIBERER.*

#### **Fernando Martín-Sánchez**

*Subdirector Gerente del Área de Informática Médica, Estrategia Digital e Innovación  
del Hospital Universitario La Paz.*

Nº de depósito legal: M-23713-2023

ISBN edición online: 978-84-09-53025-0

©2023 del contenido: Fundación Instituto Roche. Se permite la reproducción parcial, sin fines lucrativos, indicando la fuente y la titularidad de la Fundación Instituto Roche sobre los derechos de la obra.

[www.institutoroche.es](http://www.institutoroche.es)

Con la colaboración de Ascendo Sanidad&Farma.

Cómo citar este informe: Fundación Instituto Roche. Informe Anticipando: Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Medicina Personalizada de Precisión. 2023; ISBN edición online: 978-84-09-53025-0

# Contenidos

<b>PRESENTACIÓN.....</b>	<b>5</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO .....</b>	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>9</b>
La Inteligencia Artificial.....	10
Inteligencia Artificial y Medicina Personalizada de Precisión.....	13
<b>APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MEDICINA PERSONALIZADA DE PRECISIÓN .....</b>	<b>15</b>
<b>Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en la práctica clínica asistencial .....</b>	<b>16</b>
Prevención y predicción de riesgos de salud .....	16
Detección temprana y diagnóstico de enfermedades.....	18
Monitorización de enfermedades.....	19
Tratamiento de enfermedades .....	20
<b>Aplicación de la Inteligencia Artificial en la investigación y desarrollo de medicamentos .....</b>	<b>21</b>
<b>Aplicaciones en la educación y formación en biomedicina .....</b>	<b>22</b>
<b>RETOS.....</b>	<b>23</b>
<b>Retos en el desarrollo de sistemas de Inteligencia Artificial en Medicina Personalizada de Precisión.....</b>	<b>23</b>
<b>Retos de implementación y traslación a la práctica clínica.....</b>	<b>24</b>
<b>Retos relacionados con la capacitación y formación de los usuarios .....</b>	<b>25</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>27</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>27</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>29</b>





# PRESENTACIÓN

---

Los Informes Anticipando, elaborados en el marco del Observatorio de Tendencias en la Medicina del Futuro impulsado por la Fundación Instituto Roche, surgen con el objetivo de contribuir a la generación y puesta en común de los avances en áreas de conocimiento incipiente relacionadas con la Medicina Personalizada de Precisión y que formarán parte de la medicina del futuro.

El Observatorio cuenta con un Comité Asesor de expertos formado por el **Dr. Ángel Carracedo**, el **Dr. Joaquín Arenas**, el **Dr. Pablo Lapunzina** y el **Dr. Fernando Martín-Sánchez**. Entre sus funciones se incluye la selección de las temáticas que abordan estos informes, la identificación de expertos y la validación de los contenidos.

Este informe que versa sobre **Aplicaciones de la Inteligencia Artificial en Medicina Personalizada de Precisión** está coordinado por el **Dr. Víctor Maojo** y en su elaboración han participado como expertos el **Dr. Alejandro Pazos**, el **Dr. Joaquín Dopazo** y el **Dr. Xavier Pastor**.

El **Dr. Víctor Maojo** es licenciado en medicina por la Universidad de Oviedo, doctor en medicina por la Universidad de A Coruña y doctor en Informática por la Universidad Politécnica de Madrid, donde actualmente es Catedrático de Inteligencia Artificial. Además, cuenta con varias estancias posdoctorales en universidades y centros de investigación de gran prestigio mundial como *Georgia Tech*, *Harvard Medical School* y *Massachusetts Institute of Technology*. A lo largo de su carrera, se ha dedicado a la investigación sobre Inteligencia Artificial en Medicina especialmente en el estudio de sistemas expertos, *Deep Learning*, minería de datos, procesamiento de imágenes, textos, etc. En 1996, comenzó a trabajar en la integración de bases de datos biomédicas, y posteriormente en la integración de la información clínico-genómica liderando el primer proyecto europeo en este ámbito, el Proyecto INFOGENMED entre los años 2002 y 2005. También ha

coordinado el proyecto *Africa Build* en el que participaban la Organización Mundial de la Salud y socios africanos para crear centros de excelencia en tecnologías de la información que permitiesen mejorar la investigación y atención sanitaria en África. Ha sido miembro del Comité Editorial del *Journal of the American Medical Informatics Association*, *Journal of Biomedical Informatics* y *Methods of Information in Medicine* y es *Fellow* del *American College of Medical Informatics* y la *International Academy of Health Sciences Informatics*. En 1997, 1998 y 2019 recibió Premios Nacionales de la Sociedad Española de Informática de la Salud, y es Académico Correspondiente de la Real Academia Nacional de Medicina de España. Finalmente, cabe mencionar que desde 1997 participa como experto evaluador de Programas Marco en la Comisión Europea.

El **Dr. Joaquín Dopazo** es licenciado en Ciencias Químicas y doctor en Biología por la Universidad de Valencia. Actualmente es director de la Plataforma de Medicina Computacional de la Fundación Progreso y Salud del Sistema Andaluz de Salud. A lo largo de su carrera, ha dirigido departamentos de bioinformática y ciencia de datos en diferentes instituciones académicas, como por ejemplo en el Centro de Investigación Príncipe Felipe o en el Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas. Su campo de investigación gira en torno a la genómica funcional, la biología de sistemas, así como el desarrollo de nuevos algoritmos y software para el análisis de datos genómicos de alto rendimiento y datos de historias clínicas electrónicas y su aplicación a la Medicina Personalizada de Precisión y al descubrimiento de fármacos, haciendo un uso intensivo de la modelización matemática y la inteligencia artificial. Ha promovido iniciativas genómicas como el Proyecto Genoma Médico, y ha participado en numerosas iniciativas y consorcios nacionales e internacionales como, por ejemplo, el *IMPACT-data*, el *1+Million*

*genomes*; el *Innovative Training Networks* de inteligencia artificial, o la *Machine Learning for Personalized Medicine*. Finalmente, cabe mencionar que es miembro activo de sociedades dedicadas a la Inteligencia Artificial, nacionales como por ejemplo *IABiomed*, de la que es socio fundador, e internacionales como *ELLIS Society*, *European Laboratory for Learning and Intelligent Systems*.

El **Dr. Xavier Pastor Durán** es doctor en Medicina por la Universidad de Barcelona, donde actualmente ejerce como profesor titular. Durante sus primeros años y hasta 1995, ejerció como médico adjunto en la Unidad de Cuidados Intensivos Pediátricos en el Hospital Clínic de Barcelona. Posteriormente, realizó un posgrado en Dirección de Sistemas de Información por la Universidad Pompeu Fabra. Desde 1996 hasta la actualidad, es jefe de la Unidad de Informática Clínica del Hospital Clínic de Barcelona, posición desde la que ha liderado la implantación de la Historia Clínica Electrónica, Sistemas de Soporte a la Decisión Clínica y su interoperabilidad con sistemas de otras organizaciones sanitarias en el área metropolitana de la ciudad de Barcelona. Asimismo, es coordinador del Programa de “Uso Secundario de los Datos Clínicos para la Investigación Biomédica” e investigador en diversos proyectos competitivos, entre los que se encuentran: la elaboración de recurso en Internet sobre Cuidados Intensivos Pediátricos (*All-Net PicuBook*), recogida y organización de datos clínicos procedentes de Bioseñales (*LATIDO*), estructuración y representación del Conocimiento Médico (*SCOPE*), utilización de las ontologías (*INBIOMED*, diversos proyectos *FIS*, *OntoPharma* e *IMPACT*), codificación automatizada de diagnósticos y procedimientos mediante *PLN* (*ICD*, *SNOMED*), modelos predictivos en *COVID19* basados en Inteligencia Artificial, análisis de Imagen para el diagnóstico de precisión en Cáncer (*EUCanImage*) y proyectos de innovación docente (*Design2Learn*). Finalmente, cabe mencionar

que es Responsable del Centro Colaborador Académico de la OMS para el desarrollo de las Clasificaciones Internacionales de Enfermedades (*WHOFIC*), y miembro de la Sociedad Española de Informática para la Salud.

El **Dr. Alejandro Pazos Sierra** es licenciado en Medicina General y Cirugía por la Universidad de Santiago de Compostela (*USC*), doctor en Medicina por la Universidad Complutense de Madrid (*UCM*), y máster en Ingeniería del Conocimiento por la Universidad Politécnica de Madrid, donde posteriormente se doctoró en ingeniería. Desde 1999, es Catedrático del Área de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial en la Universidade da Coruña, desde 2004, director del departamento de Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información, y otros cargos como el de vicerrector desde el 1998 hasta el 2004. Cuenta con una amplia experiencia de gestión en I+D+i, y Transferencia Tecnológica, incluyendo cargos y gestión de programas y planes de Investigación y Desarrollo Tecnológico e Innovación. Además, forma parte de diversas instituciones nacionales e internacionales relacionadas con el ámbito de la investigación y desarrollo tecnológico como asesor científico técnico y miembro activo de las mismas, como por ejemplo de la Sociedad Española de Informática de la Salud donde forma parte del Comité Científico desde 1990. Por otro lado, cabe destacar su amplia experiencia investigadora dirigiendo y participando en proyectos de I+D+i, tesis doctorales, y publicaciones, convenios para acciones de transferencia tecnológica, además de sus múltiples estancias de investigación en universidades y centros de investigación de reconocido prestigio internacional, tales como, *Harvard Medical School*, *Stanford University*, *Norris Comprehensive Cancer Center de la University of Southern California*, o el Laboratorio de Informática Médica del Instituto Tecnológico de Georgia. Finalmente, desde 2021 es cofundador y experto en Inteligencia Artificial y *e-health* en *IKERDATA S.L.*



# RESUMEN EJECUTIVO

---

La disponibilidad de grandes cantidades de datos y los avances en la computación están motivando en la actualidad la transformación de muchos sectores, incluido el sector salud. En esta transformación, la **Inteligencia Artificial** se ha posicionado como una herramienta clave para la gestión y uso de dichos datos de manera óptima, con sistemas o algoritmos que emulan el comportamiento humano a la hora de realizar tareas, como la **automatización de procesos complejos** que actualmente requieren de la intervención humana, o a la **realización de cálculos que trascienden las capacidades de cualquier especialista**.

Si bien ya desde los años 70 se produjeron los primeros desarrollos relacionados con Inteligencia Artificial en el campo de la medicina, en los últimos años estamos asistiendo a un importante avance en consonancia con el desarrollo de la Medicina Personalizada de Precisión. Su capacidad para **analizar grandes volúmenes de información** (información derivada de las ciencias ómicas, datos clínicos, de imagen etc.) y **encontrar patrones complejos** llevará previsiblemente a **mejoras significativas**, desde la **prevención y predicción de riesgos de enfermedad**, la **detección y diagnóstico temprano**,

hasta la **monitorización** y el **tratamiento de enfermedades**. No solo puede suponer un cambio de paradigma en la práctica clínica habitual, sino que también será posible su aplicación en **investigación en biomedicina** con el descubrimiento de fármacos, u otras aplicaciones no bien desarrolladas todavía como su potencial para la **educación y formación** en el ámbito biosanitario.

En este contexto, es necesario abordar una serie de **retos** para conseguir una traslación de las aplicaciones basadas en Inteligencia Artificial a la práctica clínica. La **accesibilidad a datos de calidad**, la necesidad de **invertir tiempo y recursos**, la falta, en ocasiones, de **explicabilidad e interoperabilidad** de la información generada por los sistemas de Inteligencia Artificial, la **validación** de los mismos y el desarrollo de un **entorno regulatorio** que vele por los derechos y la seguridad de los pacientes, o la incorporación de **perfiles especializados** en el uso de la Inteligencia Artificial en medicina son algunos de los aspectos que deberán afrontarse en los próximos años de cara a la incorporación de la Inteligencia Artificial en la medicina del futuro, siempre de la mano y bajo la supervisión de los profesionales.





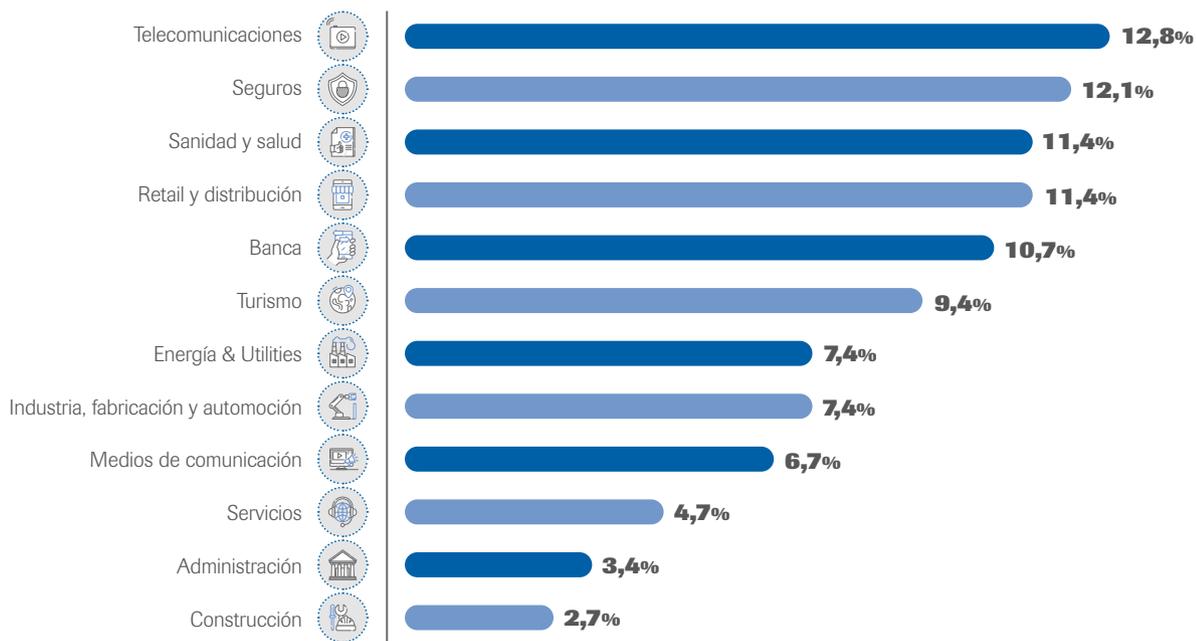


# INTRODUCCIÓN

A medida que la generación de datos se ha vuelto más exhaustiva en el campo de la salud, ha aumentado la necesidad de desarrollar herramientas capaces de recoger, analizar, interpretar e integrar una gran cantidad de datos.<sup>1</sup> En concreto, en el campo de la Medicina Personalizada de Precisión, **las ciencias ómicas** (para más información, ver [Informe Anticipando sobre Ciencias ómicas](#)) **constituyen una de las principales fuentes de datos e información** que están contribuyendo a la mejor comprensión y abordaje de los estados de salud y enfermedad; pero no son las únicas que pueden contribuir a la generación de datos, sino que también se pueden obtener de otras fuentes, como las historias clínicas electrónicas, bases de datos, sensores ambientales, tecnologías participativas de salud digital<sup>a</sup>, etc.<sup>2</sup>

Junto a la **disponibilidad de grandes cantidades de datos**, se han producido numerosos **avances en las tecnologías de la información y de la computación** que han dado lugar a herramientas con el potencial de transformar numerosos sectores y en los que se espera tengan un gran impacto, como el sector bancario, el sector de la automoción o el sector de la salud (ver Figura 1).<sup>3,4</sup> Entre las tecnologías y herramientas disponibles destaca la **Inteligencia Artificial**, que ha suscitado un gran interés por su capacidad de automatizar procesos complejos que actualmente requieren de la intervención humana para su ejecución, así como realizar cálculos y procesamientos más allá de las capacidades de cualquier especialista.<sup>5</sup>

Figura 1. Sectores con un mayor impacto esperado de la Inteligencia Artificial a corto/medio plazo.



Adaptado de (4).

<sup>a</sup> Tecnologías digitales destinadas a mejorar la salud y la calidad de vida de los pacientes que permiten a las personas actuar como agentes activos de la gestión de su propia salud.



## LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El término “Inteligencia Artificial” fue acuñado por **John McCarthy** en 1956 durante la Conferencia de Dartmouth. En ella, el Premio Nobel Herbert Simon planteó el objetivo de **desarrollar sistemas que imiten el comportamiento inteligente y presenten capacidades consideradas hasta hace poco exclusivas del ser humano** como el razonamiento, el aprendizaje, la capacidad de planificar o la creatividad.<sup>6,7</sup>

A pesar de que **algunas tecnologías de Inteligencia Artificial existen desde hace más de 50 años y los primeros planteamientos teóricos desde 1940**, no existe aún una definición consensuada de la Inteligencia Artificial; si bien la **Comisión Europea** ha propuesto una definición tras una revisión de diversas fuentes y con el objetivo de homogeneizar la terminología en este campo para así armonizar y potenciar su desarrollo. Así, los sistemas de Inteligencia Artificial pueden definirse como **sistemas de software** que, a través de la **adquisición e interpretación de datos estructurados<sup>b</sup> o no estructurados<sup>c</sup>**, del **razonamiento** sobre el conocimiento o del **procesamiento de la información** derivada de estos datos y conocimientos, son capaces de **tomar la mejor decisión para un objetivo dado**.<sup>3</sup> Estos sistemas de Inteligencia Artificial pueden usar tanto reglas simbólicas<sup>d</sup> como modelos matemáticos complejos y adaptar su comportamiento en función de cómo su entorno se ve afectado por sus acciones.<sup>3</sup>

Se pueden diferenciar **dos aproximaciones por las que la Inteligencia Artificial trata de emular al comportamiento humano**. Por un lado, está la **basada en conocimiento o “knowledge-based”**, en la que se emplean, generalmente, **“sistemas expertos”**. Estos son **programas informáticos** que almacenan el conocimiento y emulan los **procesos de toma de decisiones de profesionales expertos** en una materia determinada para resolver problemas complejos.<sup>5,8</sup> Por otro lado, de la mano de la generación masiva de datos, surgió una **aproximación guiada por datos o “data-driven”**, que **recopila, selecciona, analiza e interpreta datos** procedentes de cualquier fuente, **empleando procesos computacionales**.<sup>5,8</sup>

Además, en los sistemas de Inteligencia Artificial, se han identificado las siguientes capacidades:

- La percepción del entorno y su complejidad.

- El procesamiento del lenguaje humano y textos, así como imágenes.
- El procesamiento de información, recopilación e interpretación de datos.
- La toma de decisiones, incluyendo el razonamiento y el aprendizaje.
- La consecución de objetivos o resolución de problemas.

Si bien no existe una clasificación consensuada, en función de estas capacidades de la Inteligencia Artificial, es posible categorizar a la Inteligencia Artificial en Categorías y subcategorías (ver Tabla 1).<sup>3</sup>

- **Razonamiento**. Es el proceso por el que las máquinas transforman los datos en conocimiento o infieren información a partir de los datos con el objetivo de alcanzar conclusiones lógicas. Existen tres tipos principales de **razonamiento en Inteligencia Artificial: deductivo<sup>e</sup>**, empleado, por ejemplo, en muchos sistemas expertos médicos, **inductivo<sup>f</sup>**, típico en las ciencias naturales, y **abductivo<sup>g</sup>**, que sería clave en la elaboración, por ejemplo, de hipótesis diagnósticas en medicina, pero que no ha sido aun suficientemente desarrollado en la Inteligencia Artificial por su dificultad.
- **Planificación**. **Diseño, elaboración y ejecución de proyectos para llevar a cabo una actividad concreta** que, por lo general, la realizan máquinas inteligentes, como robots autónomos o vehículos no tripulados.
- **Aprendizaje**. Capacidad de los sistemas para **aprender, decidir, predecir, adaptarse y reaccionar automáticamente a cambios, mejorando a partir de la experiencia, incluso sin estar programados explícitamente para ello**. En este dominio, se encuentra el **aprendizaje automático o machine learning**, un enfoque algorítmico basado en el **uso de métodos matemáticos y estadísticos, capaz de generar conocimiento, respuestas y soluciones a problemas complejos de manera automática a partir de datos**.<sup>8-10</sup> En el campo del *machine learning*, se ha producido un gran desarrollo en los últimos años de lo que se conoce como **aprendizaje profundo o deep learning**. El *deep learning* es un tipo de *machine learning* basado en “arquitecturas”<sup>h</sup> avanzadas de **redes neuronales artificiales**, compuestas de **múltiples**



Tabla 1. Categorías y subcategorías de la Inteligencia Artificial en función de sus capacidades.

CATEGORÍAS	SUBCATEGORÍAS
 <b>RAZONAMIENTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Representación de conocimiento</li> <li>• Razonamiento automatizado</li> <li>• Razonamiento de sentido común</li> </ul>
 <b>PLANIFICACIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Planificación y organización</li> <li>• Búsquedas</li> <li>• Optimización</li> </ul>
 <b>APRENDIZAJE</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machine learning</li> <li>• Deep learning</li> </ul>
 <b>COMUNICACIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procesamiento del lenguaje natural</li> </ul>
 <b>PERCEPCIÓN</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visión artificial</li> <li>• Procesamiento de audio</li> </ul>

Adaptado de (4).

unidades de procesamiento (denominadas neuronas) interconectadas y organizadas en capas, inspirándose en la biología de las neuronas humanas (Figura 2). Estas capas de neuronas, a través de una serie de modelos y cálculos complejos y graduales, son capaces de analizar y procesar de manera automatizada los datos que se le proporcionan para identificar y extraer características y patrones complejos, con la finalidad de establecer clasificaciones, predicciones o descubrimiento de nuevas características en los conjuntos de datos que manejan.<sup>5,8,11</sup>

Para lograr el aprendizaje de estos sistemas existen distintas metodologías que buscan “entrenar” a los sistemas de Inteligencia Artificial:<sup>5,9,10</sup>

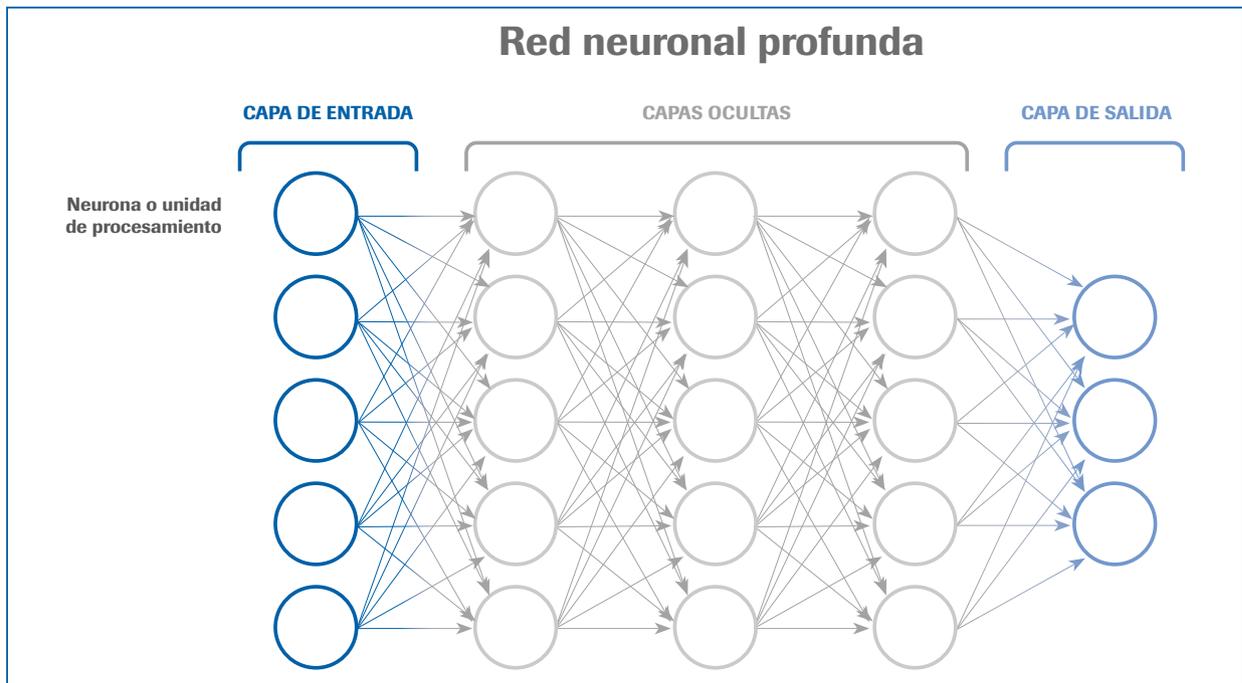
- **Aprendizaje supervisado.** Este tipo de aprendizaje requiere del “etiquetado de datos”<sup>i</sup>, un paso previo de procesamiento de los datos que se van a emplear para entrenar al sistema en la predicción de resultados. Para ello, se introducen estos datos etiquetados en el sistema, como parámetros, variables y resultados correctos de una predicción. El sistema los analiza y establece correlaciones que le permiten posteriormente clasificar elementos

o predecir estados futuros en el problema analizado. Con el aprendizaje supervisado se puede dar respuesta a dos tipos de problemas principalmente: **clasificación y regresión**. Para la **clasificación**, los sistemas reconocen características específicas dentro de un conjunto de datos y establece cómo estos deben etiquetarse. En la **regresión**, los sistemas emplean reglas estadísticas para establecer relaciones entre variables dependientes (p. ej. infarto de miocardio) e independientes (p. ej. factores de riesgo cardiovascular). Algunos ejemplos de algoritmos<sup>j</sup> de aprendizaje supervisado son los árboles de decisión<sup>k</sup>, los sistemas bayesianos<sup>l</sup>, *support vector machines*<sup>m</sup>, *random forest*<sup>n</sup>, redes de neuronas artificiales, etc.

- **Aprendizaje no supervisado.** A partir de los datos disponibles en colecciones o bases de datos, los sistemas son capaces de analizar sus características e identificar similitudes y diferencias en ellos sin necesidad de intervención humana. No existe un refinamiento ni etiquetado previo de los datos, por lo que el sistema toma como datos de entrada todos los que tenga a disposición y aprende a partir de ellos.

<sup>i</sup> Consiste en identificar datos sin procesar, como imágenes, archivos de texto o vídeos, y añadirles una o más etiquetas para especificar su contexto. <sup>j</sup> Si bien una parte considerable de la Inteligencia Artificial está basada en algoritmos, no todos los algoritmos utilizan la Inteligencia Artificial. <sup>k</sup> Algoritmo basado en una estructura jerárquica que parten de un nodo raíz diferentes ramas que clasifican en función de diferentes reglas. <sup>l</sup> Modelo de inferencia estadística basado en el Teorema de Bayes, que permite actualizar y ajustar las probabilidades a medida que se obtienen nuevos datos o evidencias. <sup>m</sup> Algoritmo que busca un plano en un espacio tridimensional que permita separar datos en diferentes categorías de manera óptima, creando un margen que maximice la distancia entre los elementos de las de diferentes clases. <sup>n</sup> Conjunto de árboles de decisión.

Figura 2. Representación de la estructura de una red neuronal profunda, formada en este caso por cinco capas de neuronas.



La información del mundo exterior entra en la red neuronal artificial a través de la capa de entrada. Los nodos de entrada procesan y analizan y los pasan a la siguiente capa. Las redes neuronales artificiales pueden tener una gran cantidad de capas ocultas. Cada capa oculta analiza la salida de la capa anterior, la procesa aún más y la pasa a la siguiente capa. La capa de salida proporciona el resultado final de todo el procesamiento de datos que realiza la red neuronal artificial. Las neuronas están enlazadas por conexiones que tienen pesos asociados, claves en el proceso de aprendizaje. Adaptado de [11].

Estos sistemas se utilizan principalmente para **tareas de agrupación o clúster, asociación y reducción de la dimensionalidad**. Para la **agrupación o clúster**, se utilizan técnicas de **minería de datos** que los procesan y analizan, **y se agregan en función de sus similitudes o diferencias**. En el caso de la **asociación**, los sistemas de aprendizaje no supervisado **identifican elementos o características frecuentes dentro de un conjunto de datos para establecer reglas que los relacionen con otros datos que presenten los mismos elementos o características**. Por último, la **reducción de la dimensionalidad** consiste en que, cuando un conjunto de datos presenta demasiadas características o dimensiones, los sistemas **analizan los datos para resumirlos**.

- **Aprendizaje por refuerzo**. Se refiere al aprendizaje basado en el **principio de “ensayo y error”**. Cuando el sistema realiza una tarea se le da una “recompensa” o “castigo” para que ajuste su comportamiento en función de esa retroalimentación.
- **Comunicación**. Capacidad de la máquina para identificar, procesar, comprender y/o generar información en las comunicaciones humanas escritas y habladas. En este sentido, el Procesamiento del Lenguaje Natural (PNL) **recopila, prepara y procesa el lenguaje humano no estructurado en forma de texto o voz para transformarlo en un lenguaje del que las máquinas sean capaces de extraer conclusiones y resultados** de manera automatizada. Estos sistemas de PLN pueden entrenarse para la **comprensión del lenguaje natural**, a través del análisis



del significado de las oraciones y aplicarlos en, por ejemplo, el reconocimiento de voz, la clasificación de textos, etc.; o para la **generación de lenguaje natural**, que se utiliza para producir texto como, por ejemplo, los *chatbots*, traductores de texto, etc.<sup>5,12</sup>

- **Percepción**. Se refiere a la **capacidad de los sistemas para tomar conciencia de su entorno a través de “sentidos”**, siendo la visión y la audición las áreas más desarrolladas. La **visión artificial o reconocimiento de patrones de imagen**, permite la identificación facial y de objetos en imágenes digitales. En cuanto al procesamiento de audio, son sistemas de Inteligencia Artificial que permiten la **percepción o generación de señales de audio, incluido el habla, pero también sonidos ambientales o música, por ejemplo**.

Todo esto permite entrever el potencial de la Inteligencia Artificial para transformar casi todos los ámbitos de la vida, y por ello, numerosos países la incluyen ya como una de sus líneas estratégicas. De hecho, en España cuenta con la **Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial**, elaborada en 2020, en la que se posiciona a la Inteligencia Artificial como una de las herramientas más prometedoras de las que dispondremos, especialmente en el área de la medicina.<sup>3,4</sup>

## INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y MEDICINA PERSONALIZADA DE PRECISIÓN

En las últimas décadas y de la mano de los avances en biología molecular, la medicina ha experimentado una gran transformación especialmente como consecuencia de los resultados del Proyecto Genoma Humano y las investigaciones posteriores, que ha supuesto un cambio de paradigma en la forma de hacer medicina, de una medicina empírica basada en síntomas se ha evolucionado a una **Medicina Personalizada de Precisión** que busca ofrecer una atención específica para cada paciente, que es también **Preventiva**, dado que busca mejorar los resultados de las estrategias de prevención y promoción de la salud, **Predictiva**, al anticiparse a la aparición de alteraciones del estado de salud de los individuos o de la población,

**Participativa**, al situar al paciente en el centro del proceso asistencial y **Periférica**, posibilitando ofrecer atención sanitaria de manera deslocalizada.<sup>13,14</sup> A este cambio están contribuyendo la **disponibilidad y accesibilidad a datos de salud, genómicos, exposómicos, clínicos, etc.** (para más información, ver Informe Anticipando sobre [Los Datos en la Era de la Medicina Personalizada de Precisión](#)), la **digitalización de la medicina** y el **desarrollo de herramientas** de la Inteligencia Artificial que permitan **manejar y explotar estos conocimientos y datos**.

El desarrollo y la aplicación de la Inteligencia Artificial en el ámbito de la medicina tiene un largo recorrido que comenzó con el diseño de **sistemas expertos** para imitar los procesos de **razonamiento en el diagnóstico y tratamiento realizados por los profesionales sanitarios**. Los primeros sistemas expertos más significativos fueron sistemas como **CASNET** (*Causal Associational Network*)<sup>5,15</sup> o **MYCIN**<sup>5,16</sup> que, partiendo de los mecanismos de razonamiento **de expertos** (en este caso, **médicos especialistas**), **podían, respectivamente, diagnosticar subtipos de glaucoma** o ayudar en la **selección de terapias antimicrobianas para pacientes con infecciones severas como las meningitis o sepsis**.

Los **sistemas expertos** continuaron avanzando durante las décadas posteriores ligados a los **avances tecnológicos y computacionales**, y al creciente interés en el desarrollo de sistemas basados en Inteligencia Artificial. Fue en los inicios de los **años 2000**, con la **consolidación de numerosos proyectos de investigación sobre genoma humano y los avances en las ciencias de la computación de la mano de los avances tecnológicos**, cuando se empezó a desarrollar con mayor éxito clínico **la Inteligencia Artificial aplicada en salud**, siendo el **machine learning** el campo de mayor progreso en los últimos años con la **disponibilidad y accesibilidad a datos de manera masiva**, por ejemplo, en Internet; la **adopción de las Historias Clínicas Electrónicas (HCE)**; el **aumento de la potencia computacional y disminución del coste de ordenadores**; la **aparición y perfeccionamiento de algoritmos cada vez más avanzados**, con el **deep learning** para el procesamiento del lenguaje natural y textos, **imágenes y voz** como ejemplo más significativo.<sup>5,17</sup>

Durante las dos últimas décadas, se han creado **grandes bases de datos etiquetados**, con el objetivo de apoyar el aprendizaje del *machine learning*. Existen numerosos ejemplos, como es el caso de **ImageNet**, una base de datos

de imagen creada para fomentar el desarrollo de sistemas de Inteligencia Artificial aplicados a la imagen. Por otro lado, el Visible Human Project, es otro ejemplo de repositorio de imágenes, creado por la *National Library of Medicine*, pionero en este campo al poner a disposición de la comunidad científica un conjunto de imágenes de uso libre y abierto.<sup>18</sup>

En este contexto, el potencial de la **Inteligencia Artificial en la Medicina Personalizada de Precisión** ha generado un gran interés debido a las mejoras que puede suponer en investigación y en la práctica clínica,

no solo para profesionales sanitarios y pacientes, sino también para el sistema sanitario con la optimización de procesos y de los recursos disponibles.<sup>2</sup> Por tanto, la Inteligencia Artificial se posiciona como una herramienta prometedora en el campo de la medicina para la **automatización de la resolución de problemas**, para **mejorar la capacidad de tomar decisiones** y para **caracterizar de forma más precisa los estados de salud y enfermedad**.<sup>19,20</sup>



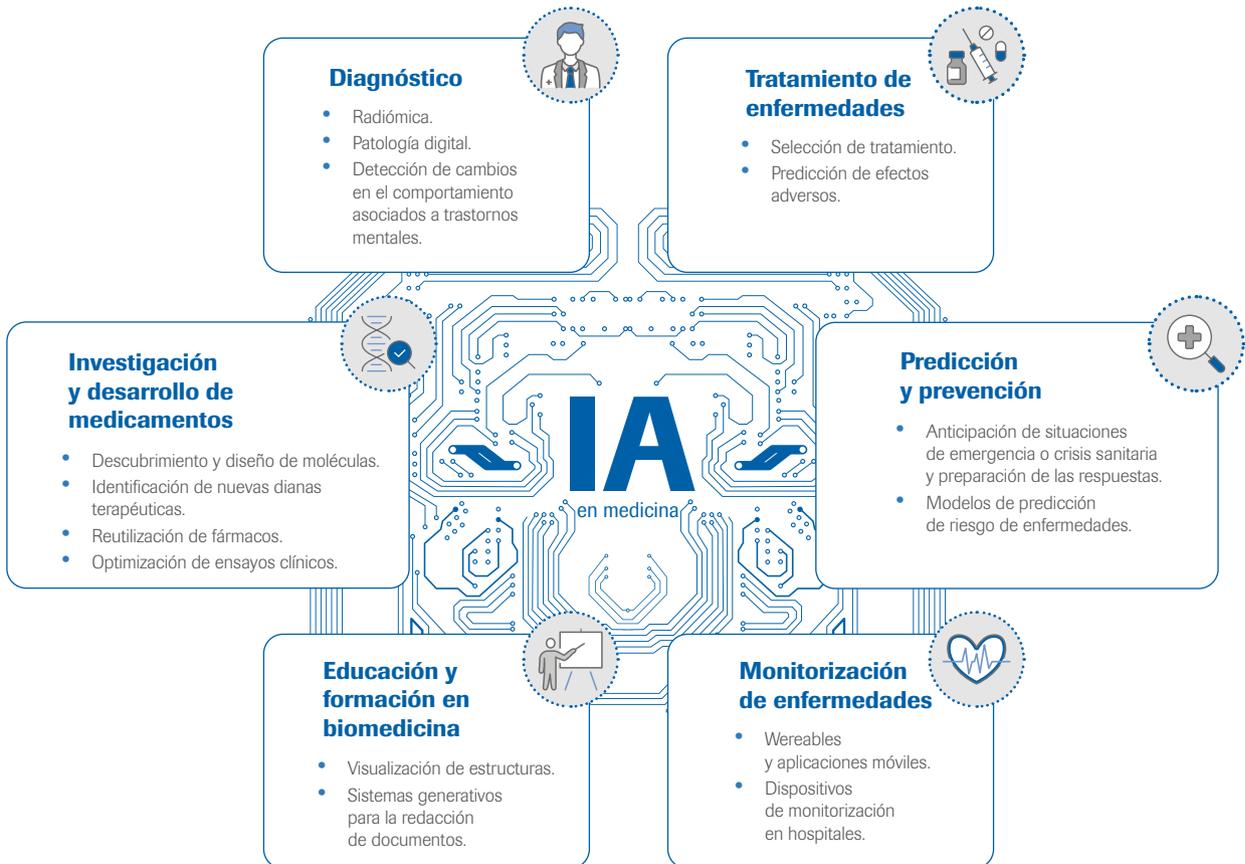
# APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MEDICINA PERSONALIZADA DE PRECISIÓN

---

El futuro de la medicina está enfocado a ofrecer un abordaje integral de la salud, teniendo en cuenta todos los factores determinantes del estado de salud o enfermedad. La generación de grandes cantidades de datos en salud ha superado la capacidad de gestionar en tiempo real toda la información disponible; por tanto, la Inteligencia Artificial puede convertirse en una herramienta de apoyo para los profesionales sanitarios que, no obstante, siempre deben seguir teniendo la última palabra en la toma de decisión. Para ello, el establecimiento de sinergias entre la Inteligencia Artificial y la Medicina Personalizada de Precisión es fundamental y con gran potencial en términos de diagnóstico, tratamiento, detección y clasificación de las enfermedades, pero también para la mejora de los procesos y de la seguridad y calidad de vida del paciente<sup>19</sup> siempre bajo la supervisión de los profesionales sanitarios.

A continuación, se revisan algunos ejemplos de la aplicación de la Inteligencia Artificial en la Medicina Personalizada de Precisión que con seguridad formarán parte de la medicina del futuro (ver Figura 3), tanto en las diferentes etapas del proceso asistencial: en la prevención y predicción de riesgos, en la detección temprana y diagnóstico de enfermedades, en la monitorización de enfermedades, en la instauración del tratamiento y abordaje integral de enfermedades, como en investigación en biomedicina, con su aplicación en la investigación y desarrollo de medicamentos, y en la formación a profesionales sanitarios e investigadores.

Figura 3. Potencial de la Inteligencia Artificial (IA) en medicina y sus diferentes ámbitos de aplicación.



Elaboración propia.

## APLICACIONES DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA PRÁCTICA CLÍNICA ASISTENCIAL

### PREVENCIÓN Y PREDICCIÓN DE RIESGOS DE SALUD

La aplicación de la Inteligencia Artificial en el ámbito de la salud está contribuyendo de manera significativa en la **mejora de medidas para la Medicina Preventiva y Salud Pública**, que actualmente se basan, en general, en algoritmos matemáticos tradicionales con capacidad

limitada para la predicción y el establecimiento de estrategias de prevención, con el objetivo de alcanzar una **Salud Pública de Precisión**<sup>9</sup>. El uso de la Inteligencia Artificial puede contribuir a manejar grandes cantidades de datos para anticipar determinadas situaciones o predecir estados de salud y enfermedad de manera precisa, con el fin último de proponer acciones que contribuyan a reducir la carga de las enfermedades en los sistemas de salud y un uso óptimo de los recursos sanitarios.

En este sentido, se han planteado aplicaciones para la anticipación de eventos y su prevención, en el propio contexto español. Por ejemplo, *“Practicum Direct”*<sup>21</sup> es una herramienta que busca **establecer relaciones entre decisiones de gestión sanitaria y el efecto que pueden**

<sup>9</sup> La Salud Pública de Precisión consiste en la mejora de la capacidad para prevenir enfermedades, promover la salud y reducir las diferencias de salud en la población mediante la aplicación de métodos y tecnologías emergentes que permitan conocer la situación global de las personas (enfermedad, patógenos, exposiciones, comportamientos) y la susceptibilidad en la población, así como el desarrollo de políticas y programas de aplicación específicos con el objetivo de adaptar las intervenciones preventivas a ciertos grupos de riesgo y mejorar la salud general poblacional. Esta disciplina, que abarca la Medicina Personalizada de Precisión, permite desarrollar soluciones personalizadas para mejorar el abordaje de la salud, poniendo el foco en la predicción y prevención de enfermedades, integrando la variabilidad genética interindividual, estilos de vida y factores medioambientales, además de todas aquellas acciones que los ciudadanos pueden llevar a cabo para la protección de su salud.



tener sobre los resultados clínicos para establecer recomendaciones. En el contexto de una **pandemia** como la provocada por el SARS-CoV-2, esta herramienta podría ayudar a entender (en un contexto crítico de ese tipo) el **impacto de la implementación masiva de, por ejemplo, la teleasistencia, el cierre de consultas de Atención Primaria o la dotación de más recursos a servicios de urgencias, sobre la atención de diferentes patologías.**<sup>22</sup> Esta herramienta permitiría anticiparse a situaciones negativas y establecer estrategias para la prevención, ayudando a estar más preparados ante posibles escenarios futuros que requieran de este tipo de decisiones.<sup>21</sup>

Otro ejemplo, derivado también de la crisis sanitaria provocada por la pandemia, es una **herramienta** de Inteligencia Artificial en desarrollo que tiene por objetivo **anticipar los brotes de COVID-19 y predecir el número de camas UCI que se ocuparían**, permitiendo **al sistema sanitario prepararse y administrar los recursos necesarios dentro de la región.**<sup>22</sup>

Por otro lado, la Inteligencia Artificial puede utilizarse también para el desarrollo de **modelos de predicción de riesgo de enfermedades** que, hasta ahora se basaban en modelos matemáticos tradicionales. Ante la creciente disponibilidad de datos, el uso de la **Inteligencia Artificial en esta línea, en un número creciente de patologías, puede contribuir a mejorar la selección de los datos empleados y optimizar la capacidad predictiva de estos modelos.** El **objetivo** principal es **mejorar la identificación de los individuos más susceptibles de beneficiarse de estrategias** para abordar o prevenir enfermedades en la población, intervenir precozmente a los pacientes de manera individualizada, orientarlos hacia estilos de vida saludables, etc., de una manera **más precisa, y proponer acciones que contribuyan a reducir la carga de las enfermedades en los sistemas de salud y un uso óptimo de los recursos sanitarios.**

Una de las áreas más desarrolladas es la **predicción de riesgo cardiovascular**, con **modelos tradicionales como el SCORE2**, cuyo objetivo es estimar el riesgo de complicaciones o mortalidad por causas cardiovasculares teniendo en cuenta factores de riesgo, como la edad, el sexo, colesterol elevado o hipertensión arterial entre otros. Este modelo, que se utiliza de manera habitual en la práctica clínica, puede mejorar su **capacidad de discriminación con la aplicación de la Inteligencia Artificial.** Un ejemplo de ello es el empleo de *machine learning* basado

en un algoritmo *random forest* sobre los datos del estudio MESA (por las siglas en inglés de “Estudio multi-étnico sobre aterosclerosis”), un estudio prospectivo para la evaluación y el seguimiento a largo plazo de enfermedad cardiovascular aterosclerótica realizado en más de 6.000 individuos.<sup>23</sup> Aplicando *machine learning*, se han identificado 20 factores que permiten predecir el riesgo de sufrir eventos cardiovasculares, como enfermedades coronarias o infartos, en un periodo de 12 años. Algunos de estos factores que contribuyen en gran medida al riesgo como, por ejemplo, la proteína C reactiva, el fibrinógeno o las interleucinas 2 y 6, no estaban incorporados en el modelo SCORE2. De esta manera, gracias a la identificación de factores de predicción adicionales con el uso del *machine learning*, se lograría una mayor precisión en la predicción de eventos cardiovasculares y su aplicación en el futuro podría contribuir a **dirigir estrategias preventivas a los pacientes de mayor riesgo** como, por ejemplo, la prescripción de estatinas.<sup>23,24</sup>

Otro estudio pionero en la aplicación de la Inteligencia Artificial para la predicción personalizada es el realizado por investigadores de Stanford, que analizaron a una persona sana, pero con antecedentes familiares de enfermedad severa cardíaca, para poder establecer una predicción de su riesgo de muerte súbita. Para ello, se analizó su historia familiar de enfermedad vascular, se realizó un estudio genómico exhaustivo, y se analizaron bases de datos de mutaciones y variantes farmacogenómicas, aplicando algoritmos para valorar el peso de las diferentes variantes encontradas e indexarlas, de cara a poder **tomar una decisión sobre la conveniencia de iniciar un tratamiento preventivo en esta persona sana, y valorar el riesgo-beneficio de la prescripción del tratamiento.**<sup>25</sup>

Otro ejemplo de cómo la utilización de la Inteligencia Artificial puede contribuir al desarrollo de modelos de predicción de riesgo es su aplicación en el campo de la **oncología.** Concretamente, se han desarrollado nuevos **algoritmos basados en machine learning para la predicción y clasificación del riesgo de cáncer de mama.** Por ejemplo, en un reciente estudio, se han comparado **tres algoritmos de machine learning frente al modelo BOADICEA<sup>P</sup>** (*Breast and Ovarian Analysis of Disease Incidence and Carrier Estimation Algorithm*) a partir de un registro suizo de datos de mujeres en el que se ha observado una **mayor capacidad predictiva de dichos algoritmos.** Además, sugiere que estos modelos tienen

<sup>P</sup> Modelo de predicción de riesgo de cáncer de mama que emplea información de mutaciones genéticas, estimas de riesgo poligénico (PRS, por sus siglas en inglés) o la historia familiar, entre otros factores, y que se encuentra en proceso de validación para su uso en la práctica clínica.

capacidad para **reclasificar el riesgo que determina el modelo BOADICEA**. De este modo, se prevé que su **utilidad clínica** en el futuro sea elevada y la información que se deriva de su uso puede tener un gran impacto sobre las **estrategias de prevención primaria y secundaria** como, por ejemplo, el establecimiento de la edad de inicio del cribado del cáncer de mama.<sup>26-28</sup>

### DETECCIÓN TEMPRANA Y DIAGNÓSTICO DE ENFERMEDADES

El abordaje temprano de enfermedades es esencial para la obtención de mejores resultados en salud y calidad de vida de los pacientes.<sup>19</sup> Por ello, es esencial la **detección precoz y el diagnóstico temprano de enfermedades**. Los **sistemas expertos basados en conocimiento**, ya mencionados en apartados anteriores, pueden emplearse como **herramienta de soporte en la toma de decisiones sobre el diagnóstico, planificación y tratamiento**, si bien, con el amplio **desarrollo del machine learning** producido en los últimos años y la **disponibilidad de mayor cantidad de datos**, podemos prever la aparición de nuevas y mejores soluciones para el soporte al diagnóstico. En este sentido, se están desarrollando numerosos **algoritmos de machine learning para la combinación e integración de datos procedentes de distintas fuentes y su aplicación a diferentes técnicas diagnósticas**, con el fin último de **mejorar la detección y ofrecer diagnósticos más precisos**.<sup>2,29</sup>

El campo en el que la aplicación de la Inteligencia Artificial para el diagnóstico está teniendo un mayor desarrollo es el de la **imagen médica** por su elevado grado de digitalización, siendo especialmente reseñable su desarrollo en el campo de la **radiología**, con el desarrollo de la **radiómica** (para más información, ver [Informe Anticipando sobre Radiómica](#)), y la **anatomía patológica**, con los avances en **patología digital**.<sup>29</sup>

Un ejemplo de **aplicación de algoritmos de machine learning y deep learning** en el campo de la **radiología** es en el estudio y diagnóstico temprano del **cáncer de pulmón**, lo que contribuiría a la **reducción de la carga asistencial** en los servicios de radiología y a mejorar la supervivencia y calidad de vida de los pacientes. El **cribado con tomografía computarizada de baja dosis (TCBD) es una estrategia eficaz para la detección temprana**

y **reducción de la mortalidad por cáncer de pulmón** en pacientes de alto riesgo. Se han desarrollado **algoritmos de deep learning para la detección y clasificación de nódulos pulmonares** con una elevada precisión en **TBCD y otras técnicas de imagen**. De esta manera, junto con la **valoración y supervisión de los resultados por parte de radiólogos expertos**, la aplicación del **deep learning** a las TBCD en pacientes de alto riesgo puede ser de gran **utilidad para el diagnóstico y clasificación del cáncer de pulmón de un individuo**, y contribuir al **avance del cribado de esta patología**.<sup>2,30</sup> Numerosos expertos anticipan un uso de la Inteligencia Artificial por los radiólogos en el futuro como una herramienta más de ayuda rutinaria a la toma de decisiones, lejos de sustituir a los especialistas en su práctica habitual.

En el ámbito de la **patología digital**, se han desarrollado sistemas de Inteligencia Artificial **para la identificación de características histopatológicas con una gran precisión en imágenes digitales de los resultados de las evaluaciones histológicas**. Por ejemplo, en **cáncer de mama** se ha desarrollado un sistema de **deep learning para el diagnóstico, clasificación e identificación temprana de micrometástasis a partir de biopsias de mama**. Se evaluó y comparó la capacidad de detección de las micrometástasis por **deep learning** en imágenes de **anatomía patológica** respecto del resultado alcanzado por patólogos experimentados. Se concluyó que la **aplicación de la Inteligencia Artificial en combinación con la supervisión experta llevó a una mayor precisión en la detección y a una reducción del tiempo de evaluación de la imagen en los estudios analizados**.<sup>31</sup>

Otras áreas donde la imagen médica es importante en el diagnóstico de enfermedades como, por ejemplo, en **oftalmología, en dermatología o en gastroenterología donde se utilizan fotografías digitales y/o vídeos digitales** para el estudio de algunas enfermedades, también pueden verse beneficiadas con la aplicación de la Inteligencia Artificial.<sup>2</sup> Por ejemplo, se ha desarrollado un **algoritmo de deep learning que ha sido entrenado por expertos oftalmólogos con más de 128.000 fotografías de fondo de ojo etiquetadas, para la detección automatizada de retinopatía diabética y edema macular diabético**. La aplicación de este algoritmo en **fotografías de fondo de ojo de pacientes diabéticos** demostró una elevada **especificidad y sensibilidad en la detección de estas patologías**. Estos resultados son prometedores



ya que, la aplicación de sistemas de Inteligencia Artificial en este campo **permitiría reducir la variabilidad en las interpretaciones de las imágenes, aumentando la precisión y rapidez en el diagnóstico.**<sup>32</sup> En el área de **dermatología**, también se están aplicando sistemas de *deep learning* para el diagnóstico de patologías de la piel a partir de **imágenes dermatoscópicas**. Se ha entrenado a sistemas de *deep learning* con imágenes dermatoscópicas digitalizadas para **el diagnóstico de cáncer de piel, de manera que permitan distinguir lesiones correspondientes a melanoma de manera rápida y eficaz**. Estas aplicaciones son **prometedoras para el soporte a los profesionales en la evaluación clínica de lesiones de piel**. De hecho, el uso de herramientas basadas en estos sistemas podría beneficiar a los pacientes desde el punto de vista de la detección temprana si se emplearan en el ámbito de la Atención Primaria.<sup>2,33</sup> Por último, en el campo de la **gastroenterología**, se están empezando a aplicar **algoritmos de Inteligencia Artificial para la identificación de pólipos en tiempo real durante las colonoscopias**. La **detección y extirpación de pólipos precancerosos** durante las colonoscopias es muy importante en el **diagnóstico temprano y prevención del cáncer colorrectal**, sin embargo, la detección de estos pólipos varía de manera significativa entre los profesionales que realizan las colonoscopias. En un estudio reciente, **se desarrolló y evaluó un algoritmo de *deep learning* que demostró una elevada precisión en la detección de pólipos precancerosos.**<sup>31</sup>

Adicionalmente, los sistemas de Inteligencia Artificial pueden emplear otras fuentes de **datos para el diagnóstico de enfermedades** más allá de las imágenes médicas, **como datos obtenidos del uso de redes sociales, donde la Inteligencia Artificial es capaz de detectar cambios en el patrón de uso que se han relacionado con la depresión.**<sup>20,34</sup> En este sentido, la **salud mental**, es un área de especial interés por la creciente incidencia de enfermedades como la depresión o la ansiedad, que se puede ver altamente beneficiada por el uso de **la Inteligencia Artificial en la detección temprana, no invasiva y efectiva de este tipo de enfermedades.**<sup>2,35</sup> Recientemente se ha publicado un **algoritmo de *machine learning* capaz de diagnosticar la depresión a través del análisis de la información de redes sociales**, tales como el tipo, la frecuencia y patrones de las publicaciones en redes sociales. Esta aplicación podría resultar muy útil

para la detección e intervención temprana de la depresión, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de los pacientes, si bien es importante señalar que es necesario tener en cuenta aspectos éticos y legales relacionados con la privacidad, consentimiento o la protección de datos de las personas.<sup>34</sup>

## MONITORIZACIÓN DE ENFERMEDADES

En los últimos años, se ha producido un importante avance en el **desarrollo y mejora de tecnologías que permiten la recogida de datos de manera continua** como, por ejemplo, los *wearables*, dispositivos o sensores de monitorización e implantes inteligentes, o incluso los dispositivos móviles. Esto ha contribuido a la **generación y disposición de grandes cantidades de datos** que pueden emplearse en el **seguimiento de los estados de salud y enfermedad de las personas**, ya que permiten **medir** diferentes tipos de **variables de manera continuada**, si bien para ello son necesarias **herramientas computacionales que permitan la interpretación, integración y optimización de la información recogida**. El desarrollo de **algoritmos de Inteligencia Artificial en combinación con estas tecnologías** puede ser de gran utilidad para el **desarrollo de soluciones que ayuden a mejorar el seguimiento y la atención** de los pacientes.<sup>2,19</sup> En el caso concreto de las **enfermedades crónicas**, como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, el cáncer o las enfermedades neurodegenerativas, estos beneficios pueden ser mayores ya que su **abordaje requiere, entre otras cosas, monitorización y seguimiento estrecho.**<sup>36</sup>

Existen algunos ejemplos del uso de la Inteligencia Artificial en combinación con diferentes tipos de dispositivos para la monitorización y seguimiento de enfermedades. Por ejemplo, en el campo de la **diabetes** existen **asistentes virtuales** que combinan el uso de **sensores para la monitorización de la glucemia con algoritmos de Inteligencia Artificial para realizar recomendaciones nutricionales y de ejercicio físico personalizadas** y adaptadas al paciente y al momento de su enfermedad.<sup>36</sup>

En el campo de la **cardiología** se ha desarrollado **Kardia**, una aplicación móvil basada en Inteligencia Artificial que permite la **detección de problemas cardíacos** como la fibrilación auricular mediante el uso de **dispositivos con sensores de electrocardiograma y actividad física**. El algoritmo de *deep learning* emplea los datos que ofrece el

dispositivo de monitorización para **detectar patrones irregulares e identificar anomalías cardíacas**.<sup>36</sup> Otro ejemplo de aplicación que combina el uso de la Inteligencia Artificial con los dispositivos es *Brainwear*, un sistema desarrollado para **evaluar la progresión de los tumores cerebrales**. Este sistema es capaz de detectar el crecimiento tumoral por alteraciones en los patrones del habla o del movimiento de las personas, sirviéndose de **acelerómetros de muñeca que permiten al sistema de *deep learning* identificar características o cambios en el patrón de la marcha relacionados con la enfermedad**.<sup>20</sup>

Si bien estos desarrollos de herramientas y soluciones que aplican algoritmos de Inteligencia Artificial a la información obtenida a través de **dispositivos o sensores de monitorización, *wearables*, e implantes inteligentes** son prometedores en la **mejora del seguimiento de los pacientes**, es importante recordar que son **complementarios y en ningún caso pretenden sustituir las evaluaciones realizadas por los profesionales sanitarios**. Además, el desarrollo de este tipo de soluciones abre la **posibilidad a los profesionales sanitarios** de realizar **seguimiento de manera remota** si se consigue la integración y uso de esta información en los sistemas sanitarios, lo que podría contribuir a **mejorar el seguimiento de manera descentralizada**, reduciendo las visitas al hospital, y mejorando a su vez la seguridad de los pacientes y su satisfacción.<sup>36</sup>

Por ejemplo, en un hospital español se ha desarrollado un **sistema que permite monitorizar las constantes de los pacientes de manera continuada en las Unidades de Cuidados Intensivos**. Se trata de un **sistema de Inteligencia Artificial semiautomático que emite recomendaciones para la administración de tratamientos en función de los datos de monitorización de constantes vitales**. El profesional sanitario recibe una alerta y decide sobre los ajustes de medicación sugeridos por el sistema. Este sistema se ha demostrado altamente eficaz y es posible que en el futuro pueda automatizarse ya que en el 90% de los casos la sugerencia ofrecida por la Inteligencia Artificial coincide con el criterio del clínico. Esto **abre la posibilidad en el futuro para el control remoto de la medicación**, que **mejoraría** en gran medida la **seguridad de los pacientes, y evitaría visitas hospitalarias innecesarias**.<sup>19,37</sup>

## TRATAMIENTO DE ENFERMEDADES

La aparición de **terapias personalizadas y tratamientos guiados por biomarcadores** está suponiendo una **revolución en el marco de la Medicina Personalizada de Precisión**, ya que **permite seleccionar el tratamiento que más puede beneficiar a cada paciente**. En este contexto, **para la selección de estas nuevas terapias es necesario conocer diferentes tipos de datos**, como por ejemplo los datos epidemiológicos, genómicos y epigenómicos, clínicos, etc. En este sentido, **las posibilidades que ofrece la Inteligencia Artificial para analizar e integrar datos heterogéneos de diferentes fuentes**, pueden contribuir a **comprender cómo afectan diferentes factores a los resultados de tratamiento** y con ello, obtener **información importante para establecer la estrategia terapéutica de manera precisa y personalizada** en cada paciente.

Gracias al uso de la Inteligencia Artificial, se pueden combinar datos genómicos y datos publicados en la literatura científica para establecer e identificar asociaciones entre las variaciones genómicas con las enfermedades o respuestas a los tratamientos. A partir de esta información, pueden desarrollarse **herramientas que ayuden a los profesionales sanitarios en la selección del mejor tratamiento y posología para cada persona**.<sup>19</sup> En **oncología**, se han realizado avances en este sentido con el desarrollo de varios **algoritmos de Inteligencia Artificial para la predicción de la respuesta a tratamientos como la quimioterapia o la radioterapia**.<sup>19,38,39</sup> Un ejemplo de ello, es un **algoritmo de *machine learning*** que ha sido **elaborado a partir de datos sobre la expresión genética y los perfiles de sensibilidad a medicamentos y entrenado para la predicción de las respuestas de los individuos a diferentes tratamientos**, demostrando una elevada precisión en la **predicción de la respuesta de los pacientes a distintos agentes quimioterapéuticos**. Este tipo de algoritmos podría ser útil para guiar a los profesionales sanitarios en la toma de decisiones sobre la instauración de **tratamientos que vayan a conseguir los mejores resultados en cada individuo**.<sup>19,39</sup>



## APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MEDICAMENTOS

La Inteligencia Artificial permite analizar grandes cantidades de datos procedentes de diferentes fuentes y transformar no solo la práctica clínica, sino también la manera en la que se investigan los nuevos medicamentos en la Medicina Personalizada de Precisión, optimizando y reduciendo los tiempos de las diferentes fases de las que se compone la investigación farmacológica.<sup>40-42</sup> De este modo, se pueden clasificar las aplicaciones de la Inteligencia Artificial, y en concreto del *machine learning* en el ámbito de la investigación farmacológica en función del objetivo que persigan:

- **Descubrimiento y diseño de nuevas moléculas.** El desarrollo de la química informática y la bioinformática han permitido identificar nuevas dianas terapéuticas, diseñar y sintetizar nuevas moléculas, cuantificar la farmacocinética<sup>q</sup> y farmacodinámica<sup>r</sup> o modelar las propiedades fisicoquímicas de las nuevas moléculas y su actividad biológica, entre otros, permitiendo analizar muchas de las moléculas a través de tecnologías computacionales. Sin embargo, la integración de estos avances, junto con la disponibilidad de datos ómicos, creaciones de biología sintética y el uso de la Inteligencia Artificial, están permitiendo acelerar los procesos de identificación y descubrimiento de moléculas con un potencial para el desarrollo de nuevos tratamientos, y nuevas dianas. Concretamente, el *machine learning* puede ofrecer información sobre los mecanismos de los fármacos y sus estructuras, permitiendo optimizar fármacos candidatos o incluso reutilizar fármacos ya utilizados para otras patologías.<sup>40</sup> Un ejemplo de ello ha sido la búsqueda de fármacos para el tratamiento de la infección por SARS-CoV-2, ya que ante la urgencia que suponía la pandemia, el diseño de medicamentos de *novo era poco factible* en términos de tiempos. En este sentido, se desarrollaron algoritmos de *deep learning* para identificar medicamentos ya disponibles en grandes bases de datos de moléculas descartadas para uso médico, como por ejemplo el atazanavir, utilizado para el tratamiento del VIH,

que pudiesen actuar sobre las proteínas virales del SARS-CoV-2.<sup>43</sup> Otra potencial aplicación para el descubrimiento de fármacos es la posibilidad de aplicar la Inteligencia Artificial para analizar bases de datos de proteínas como moléculas efectoras de las funciones celulares y su implicación en los diferentes procesos que tienen lugar en los organismos. Esto tiene gran relevancia porque a partir de la información disponible sobre la estructura y función de las proteínas, es posible crear y diseñar proteínas y otras moléculas, para que regulen diferentes funciones biológicas que pueden tener impacto sobre los estados de salud y enfermedad. En este sentido, se están desarrollando algoritmos basados en *machine learning* como *ProGen*, capaces de generar secuencias de proteínas con funciones conocidas o incluso bibliotecas de proteínas que pueden ser utilizadas con diferentes fines de investigación.<sup>44,45</sup> También se han empleado *Large Language Models*<sup>s</sup> para generar secuencias de proteínas con una función predecible, o el sistema *AlphaFold*, capaz de determinar la estructura 3D de una proteína en poco tiempo, un proceso que requería anteriormente meses o años.<sup>44,46</sup> Este tipo de herramientas significará una revolución en la investigación farmacéutica, ya que abren un abanico de numerosas posibilidades en investigación molecular.

- **Investigación clínica.** En el proceso de desarrollo de un medicamento, la investigación clínica es la etapa más extensa y que requiere una mayor inversión de recursos, por lo que es fundamental un buen diseño de los ensayos clínicos para garantizar su éxito. En este sentido, la Inteligencia Artificial puede ser utilizada para diseñar los estudios y mejorar los tiempos y resultados en salud.<sup>47</sup> Por ejemplo, la Inteligencia Artificial se puede emplear en la mejora del reclutamiento y la selección de pacientes mediante sistemas de *machine learning* que integren datos ómicos. Estos sistemas pueden identificar determinados fenotipos más susceptibles de sufrir eventos adversos graves al tratamiento, caracterizando antes del comienzo del estudio subpoblaciones de pacientes en las que previsiblemente el fármaco en estudio tendrá más éxito.<sup>47</sup> Existen en la actualidad conjuntos de datos de 400 o 500 millones de personas para la selección de candidatos

<sup>q</sup> Estudio de la acción del organismo sobre un medicamento, incluyendo los procesos de liberación, absorción, distribución, metabolismo y excreción.

<sup>r</sup> Estudio de la acción de un fármaco en el organismo, incluyendo los efectos terapéuticos y los efectos adversos.

<sup>s</sup> Algoritmos que utilizan la Inteligencia Artificial para procesar y generar texto a gran escala que se entrenan con grandes cantidades de datos de texto para la identificación de patrones lingüísticos y estructuras gramaticales.

a participar en ensayos clínicos. El aprovechamiento de esta información requiere sistemas de Inteligencia Artificial para su manejo óptimo y asegurar también la confidencialidad y privacidad de esta información personal. Otro ejemplo de la utilidad en ensayos clínicos son las posibilidades que presenta la Inteligencia Artificial en la **monitorización**, ya que los ensayos clínicos requieren un seguimiento muy estrecho y un compromiso por parte de pacientes y profesionales de mantener actualizados los datos relativos a la medicación y sus efectos. Muchas veces existe una falta de adherencia a la hora de realizar este seguimiento estrecho, lo que reduce la validez de los estudios. En este sentido, **tecnologías** como los *wearables* en combinación con la Inteligencia Artificial, permiten monitorizar y recoger de manera continua las variables y parámetros necesarios para el estudio, e incluso la **detección de endpoints<sup>t</sup> de estudio**.<sup>47</sup>

## APLICACIONES EN LA EDUCACIÓN Y FORMACIÓN EN BIOMEDICINA

En el nuevo paradigma que supone la Medicina Personalizada de Precisión, **la Inteligencia Artificial puede contribuir a mejorar notablemente la formación que reciben los profesionales tanto a nivel académico como en la práctica clínica**. Gracias al uso de Inteligencia Artificial, se pueden desarrollar **nuevas técnicas de visualización 3D** de estructuras anatómicas complejas con un elevado grado de precisión que pueden emplearse a nivel formativo para el estudio, por ejemplo, de la anatomía de estructuras complejas o de difícil acceso, y la práctica de intervenciones en medicina. Este es el caso de sistemas de Inteligencia Artificial que, en combinación con técnicas de realidad aumentada, permiten realizar **simulaciones quirúrgicas complejas** tanto para la formación y práctica de los estudiantes de medicina como para la planificación de cirugías, pudiendo simular y anticipar posibles complicaciones.<sup>48</sup>

Otro ejemplo importante son las **herramientas de búsqueda de información en grandes bases de datos** que, en combinación con **nuevos sistemas generativos y Transformers<sup>u</sup>**, pueden facilitar la **identificación y síntesis de información relevante**. De esta manera, ante la publicación masiva de artículos que se produce día a día, estas herramientas podrían contribuir a seleccionar información necesaria para la actualización constante tanto en el mundo académico como en el ámbito profesional. Por otro lado, se ha estudiado el **potencial de ChatGPT<sup>v</sup> para la educación médica**, a través de la resolución de **preguntas y casos de diferente índole para su resolución**. En este estudio, el sistema demostró una **gran capacidad para la resolución de las cuestiones**, sin embargo, **las referencias que facilitaba no siempre tenían relación con la respuesta**, lo que sugiere que estos sistemas **deben ser optimizados de cara al uso generalizado como herramienta para la educación médica**.<sup>49</sup> De momento las limitaciones de estos sistemas (como las llamadas "alucinaciones"<sup>w</sup>) o la falta de evidencias en los resultados mostrados a los usuarios, así como el entusiasmo general que han desencadenado implica tantas promesas como riesgos éticos de un mal uso que en el caso de la medicina podría tener graves consecuencias, por lo que se están impulsando regulaciones severas para su uso. De hecho, se ha probado el uso de *ChatGPT* para realizar evaluaciones de casos reales de pacientes, llegando a aciertos sorprendentes,<sup>50</sup> pero también hay numerosos estudios que muestran ejemplos de los errores que estos sistemas pueden cometer.<sup>51</sup>



# RETOS

La evolución de las ciencias ómicas, los avances moleculares, el creciente conocimiento y desarrollo de nuevas tecnologías están transformando la medicina y la investigación biomédica permitiendo entrever el gran potencial e impacto que puede llegar a tener la aplicación de la **Inteligencia Artificial en salud** para realizar tareas como el diagnóstico de enfermedades, la predicción del riesgo y la respuesta al tratamiento.<sup>2</sup> Sin embargo, es importante tener en cuenta que la mayoría de los sistemas y aplicaciones descritos se encuentran en desarrollo y validación, y su aplicación en la práctica clínica real de manera confiable, segura y generalizable plantea **retos de diferente naturaleza, tanto desde el punto de vista de su desarrollo como para su traslación a la práctica clínica habitual, y de capacitación y formación a los usuarios de los sistemas de Inteligencia Artificial.**<sup>52</sup> Cabe mencionar que, además de estos retos para el desarrollo y la implementación de la Inteligencia Artificial, es necesario tener en cuenta consideraciones éticas y legales. Estos aspectos han sido tratados ampliamente en el Informe Anticipando sobre “Inteligencia Artificial en Salud: retos éticos y legales” (para más información ver Informe Anticipando sobre “Inteligencia Artificial en Salud: retos éticos y legales”).<sup>53</sup>

## RETOS EN EL DESARROLLO DE SISTEMAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN MEDICINA PERSONALIZADA DE PRECISIÓN

Los avances tecnológicos y computacionales han permitido avanzar en la recogida, procesamiento, almacenamiento, análisis e interpretación de los datos. Estos avances han liderado el desarrollo y elevado el impacto reciente de la Inteligencia Artificial, si bien,

existen retos de carácter técnico relacionados directamente con la elevada cantidad de datos que se generan y manejan a día de hoy. A continuación, se han identificado una serie de retos en este sentido:<sup>10,52</sup>

- **La limitada disponibilidad y acceso a datos de calidad.** La disponibilidad de **datos de calidad, procesados, estandarizados, tratados y actualizados periódicamente** es fundamental para que los sistemas de Inteligencia Artificial, y en especial para los *data driven*, realicen correctamente las tareas para las que se les ha diseñado, ya que son la base de su aprendizaje. Sin embargo, la generación y almacenamiento de datos **no suele estar estandarizada ni automatizada** y, en ocasiones, el acceso a los datos generados por distintos agentes no es público, lo que dificulta que los sistemas empleen dicha información de manera adecuada. Cuando los **datos de los pacientes** se presentan dentro de un algoritmo, este los trata de manera aislada **eliminando el contexto** que, en muchas ocasiones **es importante para realizar asociaciones e identificar patrones**. Por ejemplo, las marcas temporales, es decir, cómo cambian determinados datos a lo largo del tiempo, ya que puede ser útil a la hora de tomar decisiones.
- **Los datos disponibles pueden no ser representativos y llevar a sesgos.** En las bases de datos, nos encontramos con que frecuentemente no se dispone de todos los datos posibles existentes, por lo que la información que recogen es incompleta. Un modelo de Inteligencia Artificial entrenado con los datos de estas bases de datos podría amplificar el sesgo y alcanzar resultados erróneos, pudiendo llegar a recomendar decisiones desfavorables hacia un grupo particular de personas caracterizado por edad, género, raza, nivel geográfico o económico.<sup>19</sup> Esto es debido, en parte, a que **la selección de individuos en investigación biomédica se limita en muchas ocasiones a determinados grupos poblacionales,**

fundamentalmente hombres jóvenes de origen caucásico, de manera que las asociaciones y extrapolaciones que realicen algunos sistemas de Inteligencia Artificial a partir de datos de este tipo pueden no ser correctas.

- **La fiabilidad de las soluciones y resultados obtenidos por Inteligencia Artificial.** El rápido desarrollo y uso generalizado de los **nuevos sistemas generativos y Transformers** como *ChatGPT* y los *Large Language Models* ha puesto de manifiesto el camino que falta por recorrer en su desarrollo de cara a garantizar la fiabilidad de los mismos. Estos sistemas buscan **emplear gran parte de toda la información disponible**, que puede estar contrastada o no, **para ofrecer resultados de búsqueda de información, soporte a la formación, resolución de problemas o incluso la elaboración de informes.** Sin embargo, se ha visto que pueden cometer **numerosos errores**, por ejemplo, **en el manejo de información y de datos, hechos y evidencias, la generación de textos a partir de un uso masivo de textos recopilados por el sistema o en cálculo de probabilidades, que podrían tener consecuencias fatales en el ámbito de la medicina.**<sup>49,54</sup>
- **La necesidad de invertir tiempo y recursos.** Los equipos y sistemas de computación para el manejo de datos, así como las pruebas necesarias para validar los sistemas pueden requerir de elevadas inversiones de tiempo y dinero, lo que supone una preocupación en organismos internacionales. Sin embargo, se espera que la aplicación de la Inteligencia Artificial contribuya al avance de la Medicina Personalizada de Precisión, reduzca sus costes a la vez que mejoran la calidad asistencial y, en consecuencia, contribuya a la sostenibilidad del sistema sanitario.

## RETOS DE IMPLEMENTACIÓN Y TRASLACIÓN A LA PRÁCTICA CLÍNICA

Si bien el potencial de las herramientas basadas en Inteligencia Artificial para contribuir a optimizar y reemplazar de manera más eficaz tareas en la práctica clínica, existen **retos y barreras que se deben abordar para su**

**implementación y traslación a la clínica,** fundamentalmente relacionados con la necesidad de demostrar la **utilidad de estos sistemas en un entorno muy sensible como es el de la salud.**<sup>5,10,55</sup>

- **La explicabilidad e interoperabilidad de la información generada por estos sistemas.** Los sistemas de Inteligencia Artificial, y más específicamente los de *deep learning*, son capaces de extraer patrones y generar conclusiones a partir de una gran cantidad de datos mediante el uso de fórmulas y asociaciones complejas, lo que los hace poco intuitivos. Esto hace que resulte muy complejo, para los propios sistemas de Inteligencia Artificial, e incluso para sus creadores, **explicar** cómo llegan a los resultados que obtienen. Este hecho **limita el entendimiento y la comprensión de los sistemas por parte de los profesionales sanitarios, dificultando su integración en los flujos de trabajo y generando** una falta de confianza en los resultados que éstos pueden ofrecer.
- **La dificultad para realizar evaluaciones y validaciones de los sistemas basados en Inteligencia Artificial.** Para la aplicación de cualquier tecnología en la práctica clínica habitual, es necesario comprobar su rendimiento en varios entornos clínicos, que permita asegurar la **fiabilidad de los resultados que ofrece.** En este sentido, la validación es fundamental para la **implementación en la práctica clínica real de herramientas de Inteligencia Artificial que cuenten con unos altos estándares de calidad y fiabilidad.** Sin embargo, el proceso por el que un sistema de Inteligencia Artificial genera un resultado que puede ser una propuesta de decisión clínica es altamente complejo y no puede ser validado en todas las ocasiones por los profesionales sanitarios.
- **El entorno regulatorio en desarrollo.** A pesar de que la existencia de los sistemas de Inteligencia Artificial en salud se remonta a los años 70,<sup>5</sup> **la regulación en este campo se encuentra aún en desarrollo.** La gran cantidad de sistemas y herramientas que se han lanzado en los últimos años pone de manifiesto el **vertiginoso avance de la tecnología que no se ve acompañada por los avances regulatorios.** En este sentido, existe la necesidad de generar un marco regulatorio que facilite el desarrollo de sistemas innovadores y una actualización ágil de los mismos



para promover su uso en vida real manteniendo la seguridad de los usuarios y pacientes.

- **La vulnerabilidad de los sistemas de Inteligencia Artificial.** Los sistemas de Inteligencia Artificial, como cualquier software, pueden ser hackeados, poniendo en riesgo la **privacidad, seguridad e integridad de las personas**, y pudiendo causarles daños sustanciales. Por ejemplo, si se hackea una herramienta de soporte a la decisión clínica diseñada para emitir recomendaciones sobre el ajuste de dosis del tratamiento en los pacientes, las consecuencias pueden ser fatales, especialmente si existe la posibilidad de que se evada el filtro del profesional sanitario. Por ello, existe la **necesidad de construir entornos seguros y controlados que permitan la recogida, procesamiento, almacenamiento, gestión, análisis e interpretación de los datos de una manera segura, respetando la privacidad y el establecimiento de estrategias para la protección** de los pacientes.<sup>19</sup>

## RETOS RELACIONADOS CON LA CAPACITACIÓN Y FORMACIÓN DE LOS USUARIOS

Ante las **crecientes expectativas que genera la Inteligencia Artificial**, y en concreto en el ámbito de la **Medicina Personalizada de Precisión**, y el creciente uso de estos sistemas por parte de los profesionales sanitarios y de la población general, es necesario abordar una serie de **retos para la capacitación y formación de los usuarios**. A continuación, se comentan los principales retos en este sentido.<sup>5,55</sup>

- **La capacitación de los profesionales sanitarios en el ámbito de la informática y la computación para la aplicación de la Inteligencia Artificial en salud.** La práctica clínica se está transformando debido a los avances tecnológicos y computacionales y el desarrollo de las ciencias ómicas. Sin embargo, la mayoría de los profesionales no están suficientemente formados en estas áreas de conocimiento, dado que no están incluidos de forma apropiada en los programas formativos de las carreras relacionadas con las ciencias de la salud. En el nuevo paradigma digital, **la falta de formación en el uso de nuevas técnicas y tecnologías**, así como **en el manejo e interpretación de los datos, que cada vez son mayores y procedentes de múltiples fuentes**, supone una **barrera crucial para la adopción de la Inteligencia Artificial en el campo de la medicina**. El hecho de que estos temas no se aborden en los exámenes de acceso a plazas de Formación Sanitaria Especializada, junto a que no exista una especialidad de informática clínica (como sí es el caso, por ejemplo, de Estados Unidos), contribuyen a que pocos profesionales tengan oportunidad de formarse en estos conocimientos.
- **La necesidad de incorporar profesionales especializados en la aplicación de Inteligencia Artificial en medicina.** A pesar de que existe una necesidad de crear equipos multidisciplinares para sacar el mayor partido posible a la Inteligencia Artificial en medicina, actualmente **los equipos médicos no cuentan con suficientes informáticos o expertos en computación** que contribuyan a la aplicación e instauración de herramientas de Inteligencia Artificial en la práctica asistencial. Además, estos profesionales **generalmente se encuentran fuera del entorno clínico**, por lo que se puede **retrasar la adopción de los sistemas de Inteligencia Artificial**. Además, en ocasiones la incorporación hospitalaria de estos profesionales puede depender de becas de corta duración.
- **El exceso mediático y de expectativas generadas en torno a la Inteligencia Artificial.** La población general ha conocido la Inteligencia Artificial desde una **perspectiva futurista no sustentada por la evidencia científica**, lo que genera **grandes expectativas** sobre lo que estas herramientas pueden ofrecer. Esto puede dar lugar a un **mal uso de la Inteligencia Artificial si no se vigila o no se forma a la ciudadanía en las tecnologías que, sin duda, formarán parte de la vida cotidiana de las personas**. En este sentido, en el ámbito de la medicina, el **desconocimiento de estos aspectos por parte de la población general puede desembocar en un peligro para la seguridad de los pacientes**. De hecho, desde los años 70 se han desarrollado múltiples sistemas de Inteligencia Artificial, pero muy pocos han alcanzado la práctica clínica habitual.





# CONCLUSIONES

---

La Inteligencia Artificial ha tenido un amplio desarrollo en los últimos años y ha desencadenado gran interés en muchos campos, incluido el biomédico desde principios de los años 70, con el desarrollo de herramientas que previsiblemente tendrán un gran impacto en la medicina del futuro. El uso de la Inteligencia Artificial posibilita grandes avances en el análisis de datos de diferentes fuentes, como genómicos o moleculares, y el planteamiento de soluciones con diferentes objetivos como, por ejemplo, el apoyo a la toma de decisiones clínicas, la automatización y mejora de procesos clínicos y organizativos, o ampliando de los horizontes de la investigación. En este sentido, se espera que el futuro de la Inteligencia Artificial revolucione la práctica médica asistencial, la investigación y la educación médica y, en definitiva, la vida de los pacientes, contribuyendo a configurar una medicina precisa y personalizada.

Sin embargo, a pesar de los grandes avances producidos y el potencial que deja entrever la Inteligencia Artificial en el campo de la Medicina Personalizada de Precisión, en especial con el desarrollo del *machine learning* y el *deep learning*, existen todavía muchos retos para conseguir la implementación de esos sistemas en el entorno sanitario. Para ello, de cara a avanzar en la incorporación de estas nuevas herramientas en la medicina del futuro y su integración en el sistema sanitario, a continuación, se presentan una serie de recomendaciones que permitan abordar posibles limitaciones y barreras que se encuentren en el campo de la Inteligencia Artificial.

## RECOMENDACIONES

---

- **Estandarizar la recogida y manejo de los datos de salud.** De esta manera, se facilitará el desarrollo de herramientas de ayuda a la toma de decisiones clínicas, de investigación o de gestión al disponerse de datos correctos y completos que faciliten su análisis e interpretación. En este sentido, se ha de fomentar la recogida de datos de acuerdo a unos estándares que permitan asegurar la calidad, homogeneidad e interoperabilidad de los mismos y evitar sesgos.
- **Evaluar y validar adecuadamente los sistemas de Inteligencia Artificial.** Existe una falta de transparencia que puede deberse al tipo de datos que alimentan a los modelos, a los cálculos que realiza el modelo o incluso al sobreajuste de estos modelos a las condiciones de los entornos en los que se desarrollan. De hecho, se ha visto tanto en los sistemas basados en el conocimiento (*knowledge-based*), como en los guiados por datos (*data-driven*) que se han desarrollado en hospitales, que sus resultados son mejores en el entorno en el que se han desarrollado que en otros centros debido al sobreajuste del modelo a un determinado entorno clínico. Por ello, antes de implementarse en la práctica clínica habitual los modelos basados en Inteligencia Artificial han de ser evaluados en diferentes hospitales o laboratorios, lo que requiere invertir recursos y esfuerzos en investigación para la realización de evaluaciones multicéntricas.
- **Favorecer la incorporación de la Inteligencia Artificial en protocolos clínicos, guías de práctica clínica y consensos para su uso en la práctica asistencial.** Actualmente, la práctica asistencial se basa en guías, protocolos clínicos y consensos que

apoyan la toma de decisiones en el día a día. Por lo tanto, la incorporación de las nuevas herramientas de Inteligencia Artificial, especialmente de aquellas para el soporte a la toma de decisiones, dentro de las guías, protocolos y consensos actuales contribuirá a generar seguridad sobre su uso a los profesionales sanitarios y fomentará su empleo en el entorno sanitario, mejorando previsiblemente la práctica asistencial.

- **Fomentar la formación de los profesionales sanitarios en Inteligencia Artificial e instaurar la especialidad de informática biomédica.** La formación de los profesionales en esta disciplina es escasa y en muchas ocasiones depende de la voluntad individual. En un entorno cada vez más digitalizado donde el futuro va a pasar necesariamente por la transformación digital del sistema sanitario y la incorporación de nuevas herramientas, es necesario fomentar la formación de los profesionales sanitarios en Inteligencia Artificial, entre otras competencias. De hecho, la incorporación de una especialidad en informática médica en el sistema de Formación Sanitaria Especializada podría ser un buen punto de partida para favorecer la formación de los profesionales, que serán en última instancia los usuarios de los desarrollos de Inteligencia Artificial aplicados en salud.
- **Difundir y concienciar sobre el potencial y los límites de la Inteligencia Artificial en medicina.** La Inteligencia Artificial puede ser aplicada en prácticamente todas las áreas de la medicina, y se ha demostrado su impacto en áreas como la radiología, la oncología, o la investigación farmacológica. Sin embargo, existe un componente de incertidumbre que en diferentes campos de la medicina dificulta su aplicación, por lo que no se puede considerar como una solución universal para cualquier problema médico. En este sentido, es necesario concienciar tanto a profesionales como a pacientes del potencial de la Inteligencia Artificial pero también de sus limitaciones.
- **Diseñar políticas de privacidad, confidencialidad y protección de datos.** Cada vez se generan más datos en el campo de la salud que podrían emplearse para alimentar modelos y herramientas de Inteligencia Artificial, abriendo un amplio abanico de posibilidades para la investigación y el desarrollo en esta área. Sin embargo, la exposición de datos altamente sensibles como es el caso de los datos en salud pone de manifiesto la necesidad de reforzar la privacidad y confidencialidad de los datos en salud.
- **Establecer una regulación específica para el uso de la Inteligencia Artificial en el campo de la salud.** Los avances tecnológicos suelen ir por delante de los avances regulatorios y normativos, lo que puede suponer un retraso en la aplicación y traslación a la práctica rutinaria. Las cuestiones éticas asociadas a la Inteligencia Artificial están adquiriendo cada vez mayor relevancia, y ya hay propuestas nacionales e internacionales de todos los países avanzados para avanzar en la regulación y normativas asociadas a los recursos de Inteligencia Artificial.
- **Crear una industria nacional competitiva de Inteligencia Artificial en el campo de la salud.** La inversión económica y en infraestructuras necesarias para el desarrollo y la implantación de aplicaciones de Inteligencia Artificial en salud puede llegar a ser muy elevada. En este sentido, es importante establecer sinergias que permitan desarrollar estos sistemas a nivel nacional y posicionar a los hospitales españoles como líderes en innovación tecnológica al igual que ocurre en otros ámbitos como, por ejemplo, en investigación farmacológica.

1. Álvarez-Machancoses Ó, Galiana EJD, Cernea A, de la Viña JF, Fernández-Martínez JL. On the role of artificial intelligence in genomics to enhance precision medicine. *Pharmgenomics Pers Med*. 2020;13:105-119. doi:10.2147/PGPM.S205082.
2. Topol EJ. High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nat Med*. 2019;25(1):44-56. doi:10.1038/s41591-018-0300-7.
3. Samoili S, López Cobo M, Gómez Gutierrez E, De Prato G, Martínez-Plumed F, Delipetrev B. AI WATCH. Defining Artificial Intelligence. Publications Office of the European Union. Published online 2020. doi:10.2760/382730.
4. Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial.; 2020. Accessed May 22, 2023. <https://www.lamoncloa.gob.es/presidente/actividades/Documents/2020/ENIA2B.pdf>
5. Cohen TA, Patel VL. Intelligent Systems in Medicine and Health. (International Medical Informatics Association, ed.); 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-09108-7>.
6. McCarthy J, Minsky ML, Rochester N, Shannon CE. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence;2006.
7. Qué es la Inteligencia Artificial. Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia. Gobierno de España. Published April 19, 2023. Accessed May 22, 2023. <https://planderecuperacion.gob.es/noticias/que-es-inteligencia-artificial-ia-prtr>
8. Zhang C, Lu Y. Study on artificial intelligence: The state of the art and future prospects. *J Ind Inf Integr*. 2021;23. doi:10.1016/j.jii.2021.100224.
9. Matheny M, Israni ST, Ahmed M, Whicher D, eds. Artificial Intelligence in Health Care;2022.
10. Meskó B, Görög M. A short guide for medical professionals in the era of artificial intelligence. *NPJ Digit Med*. 2020;3(1). doi:10.1038/s41746-020-00333-z.
11. Kavlakoglu E. AI vs. Machine Learning vs. Deep Learning vs. Neural Networks: What's the Difference? IBM.
12. Kavlakoglu E. NLP vs. NLU vs. NLG: the differences between three natural language processing concepts. IBM. Published November 12, 2020. Accessed May 11, 2023. <https://www.ibm.com/blog/nlp-vs-nlu-vs-nlg-the-differences-between-three-natural-language-processing-concepts/>
13. Blobel B, Ruotsalainen P, Giacomini M. Standards and Principles to Enable Interoperability and Integration of 5P Medicine Ecosystems. In: *Studies in Health Technology and Informatics*. Vol 299. IOS Press BV; 2022:3-19. doi:10.3233/SHTI220958.
14. Secretaría General de Salud Digital Información e Innovación para el SNS. ESTRATEGIA DE SALUD DIGITAL.; 2021. Accessed April 17, 2023. [https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/pdf/Estrategia\\_de\\_Salud\\_Digital\\_del\\_SNS.pdf](https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/pdf/Estrategia_de_Salud_Digital_del_SNS.pdf)
15. Weiss SM, Kulikowski CA, Amarel S, Safir A. A Model-Based Method for Computer-Aided Medical Decision-Making.
16. Edwards Shortliffe, ed. *Computer-Based Medical ConsultationS: MYCIN*. 1st ed.; 1976.
17. Fundación Instituto Roche. Los Datos En La Era de La Medicina Personalizada de Precisión.; 2019. Accessed April 17, 2023. [https://www.instituto-roche.es/recursos/publicaciones/206/Informes\\_Anticipando\\_PREDICCION\\_DE\\_RIESGO\\_DE\\_ENFERMEDAD\\_EN\\_POBLACIONES\\_EN\\_LA\\_ERA\\_DE\\_LA\\_MEDICINA\\_PERSONALIZADA\\_DE\\_PRECISION](https://www.instituto-roche.es/recursos/publicaciones/206/Informes_Anticipando_PREDICCION_DE_RIESGO_DE_ENFERMEDAD_EN_POBLACIONES_EN_LA_ERA_DE_LA_MEDICINA_PERSONALIZADA_DE_PRECISION)
18. Ackerman MJ. The Visible Human Project. *Stud Health Technol Inform*. 2021;288:134-140. doi:10.3233/SHTI210988.
19. Johnson KB, Wei WQ, Weeraratne D, et al. Precision Medicine, AI, and the Future of Personalized Health Care. *Clin Transl Sci*. 2021;14(1):86-93. doi:10.1111/cts.12884.
20. Ian Mundell. AI for Healthcare. Imperial College London. Published 2023. Accessed May 19, 2023. <https://www.imperial.ac.uk/stories/healthcare-ai/>
21. Puente-Castro A, Galdo B, Criado IS, et al. PRACTICUM DIRECT Simulator for Decision Making during Pandemics. *Engineering Proceedings*. 2021;7(1). doi:10.3390/engproc2021007048.

22. "Inteligencia Artificial para adelantarse a las necesidades de camas en las UCIs de Osakidetza. About Basque Country. Published April 16, 2020. Accessed June 12, 2023. <https://aboutbasquecountry.eus/2020/04/16/inteligencia-artificial-para-adelantarse-a-las-necesidades-de-camas-en-las-ucis-de-osakidetza/>
23. Ambale-Venkatesh B, Yang X, Wu CO, et al. Cardiovascular Event Prediction by Machine Learning: The Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis. *Circ Res.* 2017;121(9):1092-1101. doi:10.1161/CIRCRESAHA.117.311312.
24. Kampaktsis PN, Emfietzoglou M, Al Shehhi A, et al. Artificial intelligence in atherosclerotic disease: Applications and trends. *Front Cardiovasc Med.* 2023;9. doi:10.3389/fcvm.2022.949454.
25. Ashley E, Butte AJ, Wheeler MT, et al. Clinical assessment incorporating a personal genome. *The Lancet.* 2010;375:1525-1535. doi:10.1016/S0140.
26. Ming C, Viassolo V, Probst-Hensch N, Dinov ID, Chappuis PO, Katapodi MC. Machine learning-based lifetime breast cancer risk reclassification compared with the BOADICEA model: impact on screening recommendations. *Br J Cancer.* 2020;123(5):860-867. doi:10.1038/s41416-020-0937-0.
27. Centre for Cancer Genetic Epidemiology. BOADICEA. Accessed July 19, 2022. <https://ccge.medschl.cam.ac.uk/boadicea/>
28. Fundación Instituto Roche. Predicción de Riesgo de Enfermedades En Poblaciones En La Era de La Medicina Personalizada de Precisión.; 2022. Accessed April 18, 2023. [https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes\\_anticipando\\_2022\\_Prediccion\\_riesgo\\_DEF.pdf](https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes_anticipando_2022_Prediccion_riesgo_DEF.pdf)
29. Giardino A, Gupta S, Olson E, et al. Role of Imaging in the Era of Precision Medicine. *Acad Radiol.* 2017;24(5):639-649. doi:10.1016/j.acra.2016.11.021.
30. Lee JH, Hwang EJ, Kim H, Park CM. A narrative review of deep learning applications in lung cancer research: from screening to prognostication. *Transl Lung Cancer Res.* 2022;11(6):1217-1229. doi:10.21037/tlcr-21-1012.
31. Hanis TM, Islam MA, Musa KI. Diagnostic Accuracy of Machine Learning Models on Mammography in Breast Cancer Classification: A Meta-Analysis. *Diagnostics.* 2022;12(7). doi:10.3390/diagnostics12071643.
32. Gulshan V, Peng L, Coram M, et al. Development and validation of a deep learning algorithm for detection of diabetic retinopathy in retinal fundus photographs. *JAMA - Journal of the American Medical Association.* 2016;316(22):2402-2410. doi:10.1001/jama.2016.17216.
33. Esteva A, Kuprel B, Novoa RA, et al. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature.* 2017;542(7639):115-118. doi:10.1038/nature21056.
34. Eichstaedt JC, Smith RJ, Merchant RM, et al. Facebook language predicts depression in medical records. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 2018;115(44):11203-11208. doi:10.1073/pnas.1802331115.
35. Lee KS, Ham BJ. Machine Learning on Early Diagnosis of Depression. *Psychiatry Investig.* 2022;19(8):597-605. doi:10.30773/pi.2022.0075.
36. Subramanian M, Wojtuszczyzn A, Favre L, et al. Precision medicine in the era of artificial intelligence: implications in chronic disease management. *J Transl Med.* 2020;18(1). doi:10.1186/s12967-020-02658-5.
37. Enrique Carballo. Nota de prensa: "Nuestra inteligencia artificial monitoriza al paciente de UCI y propone qué dosis darle." *La Opinión A Coruña.* March 20, 2023.
38. Poudel P, Nyamundanda G, Patil Y, Cheang MCU, Sadanandam A. Heterocellular gene signatures reveal luminal-A breast cancer heterogeneity and differential therapeutic responses. *NPJ Breast Cancer.* 2019;5(1). doi:10.1038/s41523-019-0116-8.
39. Huang C, Clayton EA, Matyunina L V., et al. Machine learning predicts individual cancer patient responses to therapeutic drugs with high accuracy. *Sci Rep.* 2018;8(1). doi:10.1038/s41598-018-34753-5.
40. Filipp F V. Opportunities for Artificial Intelligence in Advancing Precision Medicine. *Curr Genet Med Rep.* 2019;7(4):208-213. doi:10.1007/s40142-019-00177-4.



41. Lee P, Abernethy A, Shaywitz D, et al. Digital Health COVID-19 Impact Assessment: Lessons Learned and Compelling Needs. *NAM Perspect.* 2022 Jan 18;2022:10.31478/202201c. doi: 10.31478/202201c.
42. Carracedo-Reboredo P, Liñares-Blanco J, Rodríguez-Fernández N, et al. A review on machine learning approaches and trends in drug discovery. *Comput Struct Biotechnol J.* 2021;19:4538-4558. doi:10.1016/j.csbj.2021.08.011.
43. Beck BR, Shin B, Choi Y, Park S, Kang K. Predicting commercially available antiviral drugs that may act on the novel coronavirus (SARS-CoV-2) through a drug-target interaction deep learning model. *Comput Struct Biotechnol J.* 2020;18:784-790. doi:10.1016/j.csbj.2020.03.025.
44. Madani A, Krause B, Greene ER, et al. Large language models generate functional protein sequences across diverse families. *Nat Biotechnol.* Published online 2023. doi:10.1038/s41587-022-01618-2.
45. Madani A, McCann B, Naik N, Keshar NS, Anand N, Eguchi RR. ProGen: Language Modeling for Protein Generation. *bioRxiv.* Published online 2020. doi: <https://doi.org/10.1101/2020.03.07.982272>
46. Jumper J, Evans R, Pritzel A, et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature.* 2021;596(7873):583-589. doi:10.1038/s41586-021-03819-2
47. Harrer S, Shah P, Antony B, Hu J. Artificial Intelligence for Clinical Trial Design. *Trends Pharmacol Sci.* 2019;40(8):577-591. doi:10.1016/j.tips.2019.05.005.
48. Park JJ, Tiefenbach J, Demetriades AK. The role of artificial intelligence in surgical simulation. *Front Med Technol.* 2022;4. doi:10.3389/fmedt.2022.1076755.
49. Eysenbach G. The Role of ChatGPT, Generative Language Models, and Artificial Intelligence in Medical Education: A Conversation With ChatGPT and a Call for Papers. *JMIR Med Educ.* 2023;9. doi:10.2196/46885.
50. Lee P, Goldberg C, Kohane I. *The AI Revolution in Medicine: GPT-4 and Beyond.* 1st ed. Pearson; 2023.
51. Weidinger L, Mellor J, Rauh M, et al. Ethical and social risks of harm from Language Models. Google DeepMind. Published December 8, 2021. Accessed July 6, 2023. <https://www.deepmind.com/publications/ethical-and-social-risks-of-harm-from-language-models>
52. Maceachern SJ, Forkert ND. Machine learning for precision medicine. *Genome.* 2021;64(4):416-425. doi:10.1139/gen-2020-0131.
53. Fundación Instituto Roche. *Inteligencia Artificial En Salud: Retos Éticos y Legales.*; 2020. Accessed April 11, 2023. [https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes\\_anticipando\\_RETOS\\_ETICOS\\_DEF.pdf](https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes_anticipando_RETOS_ETICOS_DEF.pdf) [https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes\\_anticipando\\_RETOS\\_ETICOS\\_DEF.pdf](https://www.instituto-roche.es/static/archivos/Informes_anticipando_RETOS_ETICOS_DEF.pdf)
54. Moor M, Banerjee O, Abad ZSH, et al. Foundation models for generalist medical artificial intelligence. *Nature.* 2023;616(7956):259-265. doi:10.1038/s41586-023-05881-4.
55. Matheny M. *Artificial Intelligence in Health Care. The Hope, the Hype, the Promise, the Peril.* (Israni ST, Mahnoor A, Whicher D, eds.). National Academy of Medicine; 2022.





Informe Anticipando **Microbioma**



Informe Anticipando **Medicina Preventiva Personalizada**



Informe Anticipando **Biología de sistemas**

2018



Informe Anticipando **Bioimpresión**



Informe Anticipando **Los datos en la era de la Medicina Personalizada de Precisión**



Informe Anticipando **Ciencias ómicas**

2019



Informe Anticipando **Terapias Avanzadas: Terapia celular y Terapia Génica**



Informe Anticipando **Inteligencia Artificial: retos éticos y legales**



Informe Anticipando **Exposoma**

2020



Informe Anticipando **Farmacogenómica: el camino hacia la personalización del tratamiento**



Informe Anticipando **Nanomedicina**



Informe Anticipando **Epigenómica**

2021



Informe Anticipando **Nucleoma 4D**



Informe Anticipando **Radiómica**



Informe Anticipando **Predicción de riesgo de enfermedad en poblaciones en la era de la Medicina Personalizada de Precisión**

2022





