



Cátedra Interuniversitaria
**TECNOLOGÍA, SALUD Y
SOCIEDAD**

Fundación
Ortega-Marañón

Fenin

Fundación
Fenin

INFORME I

INFORMES SOBRE TECNOLOGÍA SANITARIA Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

La Tecnología Sanitaria ante la digitalización y la inteligencia artificial

CÁTEDRA INTERUNIVERSITARIA TECNOLOGÍA,
SALUD Y SOCIEDAD

FENIN - FUNDACIÓN FENIN -
FUNDACIÓN ORTEGA-MARAÑÓN

Edita : Fundación Ortega-Marañón
ISBN: 978-84-09-73225-8
Depósito legal: M-12746-2025

Coordinadores:

Fernando Bandrés, presidente de la Fundación Fenin, codirector de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad, director del Centro de Estudios Gregorio Marañón de la FOM y catedrático de la Facultad de Medicina de la UCM.

Carmen Aláez, adjunta a la secretaría general de Fenin, codirectora de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad.

Raquel Navarro, gerente de la Fundación Fenin.

Autores:

Alexander P. Seiffert, profesor Ayudante Doctor. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid (UPM).

Álvaro Gutiérrez Martín, catedrático, director del Laboratorio de Robótica y Control. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM.

Blanca Larraga García, profesora permanente laboral. Laboratorio de Robótica y Control. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM.

Carmen Aláez Usón, adjunta a la secretaría general de Fenin, codirectora de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad.

Celia Chicharro Miguel, doctora en Nutrición Humana y Dietética, investigadora del Centro de Estudios Gregorio Marañón. Fundación Ortega-Marañón (FOM).

Enrique J. Gómez Aguilera, catedrático de la UPM, director del Grupo de Bioingeniería y Telemedicina E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM, presidente de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica y miembro del Comité Científico de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad.

Fernando Bandrés Moya, presidente de la Fundación Fenin, codirector de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad, director del Centro de Estudios Gregorio Marañón de la FOM y catedrático de la Facultad de Medicina de la UCM.

Gema García Sáez, profesora permanente laboral. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecom. Centro de Tecnología Biomédica, UPM.

Ignacio López Parrilla, presidente del sector de Salud Digital de Fenin.

Jaime Agüero Ramón Llin, doctor del Servicio de Cardiología del Hospital Universitario y Politécnico La Fe de Valencia.

Marcial García Rojo, jefe de servicio y director de la UGC de Anatomía Patológica del Hospital de Jerez de la Frontera.

María Cruz Martín Delgado, jefa servicio Medicina Intensiva Hospital Universitario 12 de Octubre de Madrid.

Patricia Sánchez González, profesora titular y coordinadora del Grado en Ingeniería Biomédica. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM.

Sara Bandrés Hernández, doctora en Derecho Sanitario, profesora de la Facultad de Medicina de la UCM, investigadora del Centro de Estudios Gregorio Marañón de la FOM.

Y con la colaboración del Comité Científico de la Cátedra Interuniversitaria Tecnología, Salud y Sociedad

Ana Pastor, presidenta de la Agrupación Mutua Aseguradora (A.M.A.), exdiputada y vicesecretaria general del PP.

Antoni Ivorra, coordinador del Grado en Ingeniería Biomédica de la Universidad Pompeu Fabra Full Professor, Serra Hünter and ICREA Acadèmia Fellow Biomedical Electronics Research Group, BCN MedTech.

Antonio Buño, jefe de servicio de Medicina de Laboratorio del Hospital Universitario La Paz de Madrid, presidente de la Sociedad Española de Medicina de Laboratorio y presidente electo de la nueva Sociedad Española de Medicina de Laboratorio.

Beatriz Giraldo, profesora agregada de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) - Instituto de Bioingeniería de Cataluña (IBEC), UPC - IBEC.

Carmen Ayuso, jefa corporativa del departamento de Genética, directora científica del IIS-FJD. Subdirectora de Investigación en el Hospital Universitario Fundación Jiménez Díaz.

Concepción Morales García, jefa de Servicio de Neumología del Hospital Virgen de las Nieves de Granada.

Guillermo Gervasini Rodríguez, catedrático de Farmacología en la Facultad de Medicina y Ciencias de la Salud de la Universidad de Extremadura.

Guillermo Pradés, director del Departamento de Odontología Conservadora y Prótesis de la Universidad Complutense de Madrid y presidente de la Sociedad Española de Prótesis Estomatológica y Estética (SEPES).

Héctor Sánchez, director del Instituto de Salud Pública de la Universidad Andrés Bello de Chile.

Inés López-Ibor, catedrática y directora del Departamento de Psiquiatría de la Universidad Complutense de Madrid.

José María Balibrea, jefe de Cirugía Endocrino-Metabólica y Bariátrica en el Hospital Universitario Germans Trias i Pujol y secretario del comité científico de la Asociación Española de Cirujanos.

José Soto Bonel, gerente del Hospital Fundación Instituto San José y presidente de SEDISA.

Juan Antonio Vargas, catedrático y jefe de servicio de Medicina Interna en el Hospital Universitario Puerta de Hierro de Madrid. Ex decano de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM).

Julio Mayol, catedrático de Cirugía de la Universidad Complutense de Madrid, jefe de servicio del Hospital Clínico Universitario de Madrid.

Luis Donoso, consultor en la Dirección de Investigación e Innovación. Hospital Clínico de Barcelona. Presidente de la Fundación España Salud.

Miriam Leonor Torres, decana de la Escuela de Ciencias de la Salud de la Universidad a Distancia y Abierta de Colombia.

Índice

I. Marco conceptual tecnológico 08

1. Origen y evolución de la técnica.
2. Sobre la tecnología.
3. Sobre la tecnociencia.
4. Sobre la innovación.

II. La digitalización en procesos clínicos. Sistemas departamentales 22

1. Introducción.
2. Casos de uso.
 - 2.1 La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Anatomía Patológica.
 - 2.1.1 Descripción de los Sistemas de Información disponibles y su función.
 - 2.1.2 Desarrollo de evidencias y casos donde aportan valor en salud y eficiencia.
 - 2.1.3 Nivel de adopción de estas tecnologías.
 - 2.1.4 Barreras para el despliegue de los sistemas de información.
 - 2.1.5 Tendencias y visión.
 - 2.1.6 Conclusiones.
 - 2.1.7 Referencias.
 - 2.2 La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Medicina Intensiva.
 - 2.2.1 Sistemas de información clínica.
 - 2.2.2 Nivel de adopción en España de soluciones departamentales de críticos.
 - 2.2.3 Impacto de los SIC y la digitalización.
 - 2.2.4 Barreras para el despliegue de los Sistemas de Información Clínica en UCI.
 - 2.2.5 Conclusiones.
 - 2.2.6 Referencias.
 - 2.3 La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Cardiología.
 - 2.3.1 Descripción de los Sistemas de Información disponibles y su función.
 - 2.3.2 Desarrollo de evidencias y casos donde aportan valor en salud y eficiencia.
 - 2.3.3 Nivel de adopción de estas tecnologías.
 - 2.3.4 Barreras para el despliegue de los sistemas de información.
 - 2.3.5 Tendencias y perspectivas de futuro.
 - 2.3.6 Conclusiones.
 - 2.3.7 Referencias.

III. Inteligencia Artificial y Tecnología Sanitaria. Presente y futuro.

56

1. Introducción.

2. Inteligencia Artificial en las imágenes médicas.

2.1 Aplicaciones actuales de la IA en imagen médica.

- 2.1.1 Optimización de la calidad y eficiencia en la adquisición y reconstrucción de imágenes.
- 2.1.2 Segmentación de imágenes médicas asistida por IA.
- 2.1.3 Detección, clasificación y diagnóstico automatizado con IA.
- 2.1.4 Radiómica: El análisis cuantitativo de imagen médica.

2.2 Aplicaciones de la IA generativa en la imagen médica.

- 2.2.1 Generación de imágenes sintéticas.
- 2.2.2 Modelos de Lenguaje en la interpretación y explicabilidad de la imagen médica.

2.3 Desafíos y oportunidades para la IA en imagen médica.

2.4 Referencias.

3. Inteligencia Artificial en la robótica médica.

3.1 Aplicaciones de IA en cirugía asistida por robots.

- 3.1.1 Automatización de tareas quirúrgicas.
- 3.1.2 Estabilidad del robot.
- 3.1.3 Monitorización en tiempo real.
- 3.1.4 Asistencia con realidad aumentada.

3.2 Aplicaciones de la IA en robots de neurorrehabilitación.

- 3.2.1 Evaluación y diagnóstico.
- 3.2.2 Control del robot.
- 3.2.3 Monitorización y predicción de recuperación.

3.3 Desafíos y oportunidades para la IA en la robótica médica.

3.4 Referencias.

4. Inteligencia Artificial en la salud móvil y medicina personalizada.

4.1 Aplicaciones de la IA en salud móvil para el seguimiento remoto de pacientes con enfermedades crónicas.

4.2 Aplicaciones de la IA en salud móvil para autocuidado, promoción de la salud y envejecimiento saludable.

4.3 Aplicaciones de la IA en medicina personalizada y fenotipo digital.

4.4 Chatbots y asistentes virtuales en salud.

4.5 Protección de datos y ética en salud móvil y medicina personalizada.

4.5.1 Consideraciones éticas en el uso de IA en la monitorización remota.

4.5.2 Explicabilidad y transparencia en los algoritmos de IA en salud móvil.

4.5.3 Seguridad de los datos y riesgos.

4.5.4 Evaluación de aplicaciones de salud móvil.

4.6 Desafíos y oportunidades para la IA en salud móvil y medicina personalizada.

4.7 Referencias.

5. Conclusiones

IV. Tecnología sanitaria y humanización. Perspectivas

102

V. Conclusiones

124

VI. Bibliografía complementaria

128

Presentación

La Fundación Fenin y la Fundación Ortega-Marañón, a través de su Centro de Estudios Gregorio Marañón, tuvieron la iniciativa, pionera e innovadora en el ámbito académico profesional y científico, de crear, en 2023, la primera Cátedra Interuniversitaria sobre Tecnología, Salud y Sociedad.

Es el resultado riguroso de conjugar la visión, misión y objetivos de ambas fundaciones, que tradicionalmente miran a la ciencia y el pensamiento, comprometidas con el desarrollo de las tecnologías sanitarias en el marco singular del cuidado de la salud.

Sus objetivos fundamentales son el estudio, divulgación, investigación y transferencia de conocimiento acerca de la importancia de las tecnologías sanitarias en el ámbito de la medicina, las ciencias de la salud y de la vida, determinantes, para una asistencia sanitaria de excelencia.

Vivimos un tiempo tecnológico extraordinario, vinculado a la conectividad y la tecnociencia, que reclama también un nuevo “humanismo tecnológico”.

El Premio Nobel Gabriel García Márquez refería en su obra, respecto de su pueblo ficticio Macondo, cómo el mundo era tan reciente que había que señalar las cosas con el dedo, pues todavía no había palabras. Hoy ya están aquí, robótica, Inteligencia Artificial, digitalización, chatGPT, medicina de precisión y personalizada, tecnoética, ingeniería biomédica, bioinformática, neuroderechos, ciberseguridad, y tantas otras; incluso se incorpora el término “ciencia ciudadana”, que desde 1996 recoge el compromiso y participación de los ciudadanos para el mejor desarrollo de la tecnología, aplicada también a la salud social.

Afrontamos desde la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad un nuevo reto a la reflexión intelectual acerca de cómo las tecnologías sanitarias son determinantes en el presente y futuro del cuidado de la salud, pues es un tema de gran importancia social y sanitaria de nuestro tiempo.

Necesitamos tener conceptos claros acerca de las nuevas áreas de conocimiento que lo conforman y de sus relaciones especialmente aplicadas en el ámbito de la asistencia sanitaria, consolidando así el lema de la Fundación Fenin de que son “tecnologías para vivir”, acorde con la definición de salud del médico humanista Jordi Gol: “*la salud es una manera de vivir autónoma, solidaria y gozosa*” y aceptando intelectualmente el camino del conocimiento científico en medicina y ciencias de la salud:

La ciencia, a pesar de sus progresos increíbles, no puede ni podrá nunca explicarlo todo. Cada vez ganará nuevas zonas a lo que hoy parece inexplicable. Pero las rayas fronterizas del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio.

Si caminamos por la historia de la medicina, las ciencias de la salud y de la vida, nos adentraremos paulatinamente en las ciencias biomédicas actuales y percibiremos con claridad cómo la observación científica genera tal cantidad de información, que “el dato” ha permitido reemplazar al mito; la madurez del razonamiento y el método científico nos ha llevado a proponer teorías, y superar así las fantasías. Finalmente, la experiencia nos ha ido llevando al pronóstico y la predicción, sustituyendo antiguas profecías. En ese recorrido la tecnología sanitaria mira al horizonte y tiene la noble aspiración de ser una tecnología para curar y cuidar, desarrollando así un nuevo “humanismo tecnológico”.

El presente informe es el primero del proyecto que la Cátedra ha denominado “*Informes sobre tecnología sanitaria y transferencia de conocimiento*”. Pretendemos en él, desde la observación y el compromiso, inter y multidisciplinar, generar no solo una actualización de los temas o aportar una rigurosa información, sino crear también una mayor sensibilidad social acerca del valor fundamental de las tecnologías sanitarias en nuestro tiempo, pues sabemos que son capaces de personalizar el ejercicio profesional de la medicina y por ello son determinantes en la humanización de la asistencia sanitaria.

Este informe trata sobre: “*La tecnología sanitaria ante la digitalización y la Inteligencia Artificial*”. Aporta no solo nuevos conceptos, sino que insinúa nuevas formas de entendimiento capaces de construir nuevos paradigmas y horizontes sanitarios. La asistencia sanitaria digitalizada o las aplicaciones de la Inteligencia Artificial están llamadas a ser la innovación disruptiva de los modelos y sistemas sanitarios de nuestro siglo capaces de influir de manera determinante en la autonomía estratégica y los nuevos modelos sociales del siglo XXI. Aunque resulte tópico decir que el orden de los factores no altera el producto, no es el caso del título de este trabajo en el que las palabras *digitalización*, *Inteligencia Artificial*, *tecnología* y *salud* se ordenan de forma que permiten transmitir una nueva mirada al complejo mundo de la medicina y las ciencias de la salud para convertirse en instrumentos privilegiados que permitan intuir las nuevas perspectivas de las tecnologías sanitarias para el cuidado de la salud.

La capacidad innovadora de las nuevas tecnologías permite también elaborar un nuevo prisma de la asistencia sanitaria para nuestro tiempo, pues exige de una continua formación para adquirir y entender nuevos conceptos y hacerlo desde una visión multidisciplinar y de transferencia de conocimientos, exigibles para poder divisar el nuevo horizonte de la asistencia sanitaria de nuestro siglo en términos de calidad, seguridad, eficiencia, gestión, sostenibilidad y excelencia profesional.

Expresamos nuestro agradecimiento a los autores que han elaborado este documento por haber compartido su experiencia y conocimiento: *Alexander P. Seiffert*, profesor Ayudante Doctor. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM; *Álvaro Gutiérrez Martín*, catedrático, director del Laboratorio de Robótica y Control. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM; *Blanca Larraga García*, profesora permanente laboral. Laboratorio de Robótica y Control. E.T.S.I. Telecomunicación, UPM; *Carmen Aláez Usón*, adjunta a la secretaría

general de Fenin, codirectora de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad; *Celia Chicharro Miguel*, doctora en Nutrición Humana y Dietética, investigadora del Centro de Estudios Gregorio Marañón de la FOM; *Enrique J. Gómez Aguilera*, catedrático de la UPM, director del Grupo de Bioingeniería y Telemedicina E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM, presidente de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica y miembro del Comité Científico de la Cátedra Tecnología, Salud y Sociedad; *Fernando Bandrés Moya*, presidente de la Fundación Fenin, codirector de la Cátedra Tecnología Salud y Sociedad, director del Centro de estudios Gregorio Marañón de la FOM y catedrático Facultad de Medicina de la UCM; *Gema García Sáez*, profesora permanente laboral. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM; *Ignacio López Parrilla*, presidente del sector de Salud Digital de Fenin; *Jaime Agüero Ramón Llin*, doctor del Servicio de Cardiología del Hospital Universitario y Politécnico La Fe de Valencia; *Marcial García Rojo*, jefe de servicio y director de la UGC de Anatomía Patológica del Hospital de Jerez de la Frontera; *Patricia Sánchez González*, profesora titular y coordinadora del Grado en Ingeniería Biomédica. Grupo de Bioingeniería y Telemedicina. E.T.S.I. Telecomunicación, Centro de Tecnología Biomédica, UPM; *Sara Bandrés Hernández*, doctora en Derecho Sanitario, profesora de la Facultad de Medicina de la UCM, investigadora del Centro de Estudios Gregorio Marañón de la FOM y a los miembros del Comité Científico de la Cátedra Interuniversitaria Tecnología, Salud y Sociedad por su compromiso y colaboración.

INFORME I

LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

I. Marco conceptual tecnológico.

1. Origen y evolución de la técnica.
2. Sobre la tecnología.
3. Sobre la tecnociencia.
4. Sobre la innovación.



Marco conceptual
tecnológico.



Marco conceptual tecnológico

Los conceptos son formas de entendimiento que evolucionan con nosotros y en nuestro tiempo. Los conceptos claros hacen la realidad más habitable, como escribiera Ortega y Gasset en 1923:

¡Claridad, claridad demandan ante todo los tiempos que vienen! El viejo cariz de la existencia va siendo arrumbado vertiginosamente, y adopta el presente nueva faz y entrañas nuevas.

Y hemos de hacer este nuevo viaje del conocimiento, mostrando también a las nuevas generaciones nuestras emociones: “la alegría de partir, el temblor de la peripecia, la ilusión de llegar y el miedo a perderse”.

La Ciencia es el conocimiento científico que resulta de una actividad indagatoria. Tres elementos componen el desarrollo científico: la motivación humana por conocer su entorno, la actividad investigadora y el resultado de un conocimiento. Ciencia significa conocimiento, el Saber, y utiliza un método o camino. La investigación es una actividad dirigida a la obtención de nuevos conocimientos, que en muchas ocasiones se aplicarán al desarrollo de nuevas tecnologías. Como proceso intelectual complejo requiere de una sistemática, que se inicia a partir de hipótesis y objetivos. Con una organización y mediante protocolos de trabajo se obtienen resultados, cuya interpretación debe discutirse con evidencias similares y libres de todo prejuicio.

“Múltiples tipos de investigación científica que se pueden desarrollar, ya sea básica, aplicada, cuantitativa o predictiva”

Dentro de los múltiples tipos de investigación científica que se pueden desarrollar, ya sea básica, aplicada, cuantitativa o predictiva, destacamos la clasificación que mejor nos sirve para evidenciar la relación entre ciencia, técnica y tecnología sanitaria:





Investigación Multidisciplinar

Se acerca al objeto de estudio, la salud, desde diferentes disciplinas. Hoy resulta obvio considerar que la atención sanitaria tiene un carácter multiprofesional.



Investigación Interdisciplinar

Se caracteriza porque aporta criterios teóricos y metodológicos integrados en el quehacer sanitario y la actividad asistencial.



Investigación Transdisciplinar

Se caracteriza por una integración del conocimiento en virtud de la convergencia de disciplinas que intervienen y se ven afectadas por la investigación sanitaria. Es una forma de investigación sanitaria donde se produce de manera fundamental la transferencia de conocimiento.

Sabemos que la investigación científica se fundamenta en la observación sistemática de fenómenos naturales y supone el descubrimiento de una ley natural hasta ese momento desconocida. Una ley que por evidencia lógica se conforma en un saber. La acumulación de hallazgos o saberes relacionados entre sí y ordenados convierte la Ciencia en un cuerpo de conocimientos sistematizados en el que, para conocer más, ha de investigarse más y para indagar más acerca de algo, ha de superarse el concepto de observación natural. De esta manera y conforme a esta necesidad investigadora, la técnica se introduce en el método científico, y los productos técnicos; ya sean bienes, servicios, métodos o procesos, procuran y permiten el descubrimiento de nuevos conocimientos que, de nuevo, solo pueden ser “observados” mediante la aplicación de técnicas.

Surge así una dependencia entre Ciencia y Técnica que se define por el hecho de que, para conocer y descubrir nuevos saberes, han de inventarse procedimientos técnicos; y para inventar métodos técnicos, ha de adquirirse un conocimiento racional previo. Esta realidad científico-técnica o técnico-científica ha supuesto la esperada superación de la “observación”, y en consecuencia ha posibilitado dar continuidad a la trayectoria pro-

gresista del conocimiento científico, pues ha permitido la adquisición de nuevos conocimientos, imposibles de alcanzar sin la incorporación de técnicas al método científico de la investigación. Esta superación comporta una nueva forma de conocer caracterizada por el acto de ceder a la invención un lugar en el método científico. Es por ello que la generación de conocimiento, ciencia, en todos sus ámbitos, su difusión y las aplicaciones que de ella se derivan, son actividades esenciales para el progreso social, en el que la cultura científica, tecnológica e innovadora son fundamentales para la competitividad social y el desarrollo de los modelos productivos.

En el ámbito de la medicina y las ciencias de la salud resulta fundamental la estrecha relación, la vinculación, entre el método científico y la práctica clínica. Es la traslación del conocimiento la clave para abordar los retos de las tecnologías sanitarias en nuestro siglo, lo que hace necesario desarrollar planes estratégicos que permitan establecer las prioridades de investigación, mejorar las competencias científicas, desarrollar un análisis crítico de la calidad y pertinencia de los hallazgos, afrontar los conflictos de interés, y desarrollar una estrategia de divulgación rigurosa de la ciencia en la sociedad.

1. ORIGEN Y EVOLUCIÓN DE LA TÉCNICA

La medicina y las ciencias de la salud, consideradas habitualmente como ciencias sociales y no verdaderas ciencias o “ciencias puras”, presentan hoy un cambio conceptual, pues su desarrollo y evolución tienen lugar desde las tecnologías más complejas y los conocimientos científicos más avanzados; pensemos en la robótica, la ingeniería de tejidos, la medicina nuclear, los trasplantes, la biología de sistemas, el diagnóstico molecular, la imagen médica, la bioinformática o la nanomedicina, entre otras muchas actividades, que hacen imprescindible la presencia de las ciencias básicas y el método científico más riguroso a fin de mantener un diálogo permanente con el ejercicio de la medicina clínica, capaz de conformar el extraordinario desarrollo de la medicina traslacional en un sentido bidireccional y un diálogo profesional recíproco.

En el ámbito de las ciencias de la salud, el pensamiento científico suele caminar transitando desde lo particular, el caso, para concluir en lo general, reconociendo que para saber hay que recorrer el largo camino de “llegar a saber”. Esta mentalidad científica nos va alejando de la especulación y nos exige aceptar como cierto solo lo que resulta verificable. Es entonces cuando nuestro contacto con la realidad necesita tecnificar el método de observación para medir con la mejor precisión y exactitud matemática. Los elementos de la técnica se incorporan entonces al proceso de investigación científica. Ciencia y técnica se complementan y se inicia todo un proceso evolutivo de “cientificación del conocimiento”.

Con Aristóteles, el pensamiento se dividía en tres categorías: *episteme* (conocimiento), *doxa* (opinión), y *téchne* (técnica). *Tekhnicos* indica “el que hace”, habilidad y destreza para ejercer un oficio, incluso se refiere a tejer, fabricar, o crear.

La *téchne* aristotélica era superior a la experiencia e inferior al razonamiento, entendido como el puro pensar. Por lo tanto, la *téchne* no es algo innato, sino que resulta de recorrer un camino de aprendizaje, de práctica y estudio, buscando la perfección técnica, para llegar a ser un conjunto de procedimientos, acordes con un método, que expresan una determinada destreza y una finalidad.

Por otro lado, el término *téchne*, traducido por *ars* “arte”, designa una habilidad mediante la cual se hace algo, en el sentido de transformar una realidad natural en una realidad artificial. Habilidad que requiere cumplir unas reglas, por eso se identificó con *oficio*; así hablamos de una *téchne* de la navegación o “arte de navegar”, incluso una *téchne* del gobierno o “arte de gobernar”. La *téchne* tiene para los griegos la consideración de saber hacer algo manual, pero además está vinculada con la *episteme*, con conocer, con hacer salir algo de lo oculto, de lo ignorado. Estaríamos entonces ante un conjunto de saberes eficaces acompañados del conocimiento, de sus razones y causas, por lo tanto, vinculados a una actividad creativa. Esta *téchne* era una actividad rutinaria, productiva y repetitiva, vinculada con la inteligencia y la ciencia. Una forma de aplicación sistemática de la inteligencia a todos los campos de la actividad humana.

Sabemos cómo a partir del siglo XIII el concepto de técnica se instrumentaliza paulatinamente, entrando en la racionalidad científico-técnica y en la separación entre ciencia, moral y arte, esferas que en la Antigüedad estaban unidas por la religión. Reemplazando el concepto griego de *téchne*, la ciencia moderna es cada vez más instrumentalista, conformando los nuevos conceptos de técnica y tecnología que se consolidarían durante los siglos XVI y XVII.

La investigación de la naturaleza se hace objetiva y experimental, necesita cuantificar, medir y expresar de forma matemática sus hallazgos. Galileo, Bacon, Descartes y Newton, entre otros muchos, fueron determinantes para aceptar como cierto solo lo que resulte empíricamente verificable; no basta la especulación y el contacto con la realidad, su investigación se tecnifica, el instrumento y su técnica de manejo se convierten en el fundamento que sustenta la nueva visión del mundo, como refiere el historiador de la ciencia Benjamin Farrington: “La exaltación del conocimiento práctico contenido en las técnicas hasta hacer de él un método de análisis de los fenómenos naturales fue el paso verdaderamente revolucionario”.

Ortega y Gasset distingue la evolución de la historia de la técnica en un primer estadio, la técnica del azar propia del hombre primitivo; luego vendría el estadio de la técnica del artesano propia de la Antigüedad y la Edad Media, y finalmente el estadio de la técnica del técnico de la Edad Contemporánea, propio de la importancia que adquiere la máquina y que permitió diferenciar al técnico, del artesano y el obrero.

El concepto de la técnica se refiere pues a las acciones que permiten al hombre adaptar el medio ambiente a sus necesidades (y no al revés) y construir un entorno “artificial” alrededor de su vida. El término *artificial* se refiere a una intervención intencional del hombre en la naturaleza al punto de que se convierte en una característica fundamental de su propia naturaleza, como refiere el profesor Omar Montoya¹:

la técnica, en sí misma, es un fenómeno consustancial a la propia existencia de la especie humana... La técnica es nuestra naturaleza; es la forma humana de estar en el mundo; sin técnica, no hay humanidad propiamente dicha ... El hombre es un animal incompleto. Ahora bien: esas carencias fisiológicas son sustituidas por un desarrollo único de su capacidad intelectual. Y dentro de esa capacidad intelectual se halla la aptitud de utilizar instrumentos y servirse de ellos para adaptarse al medio. Eso es la técnica. Por lo tanto y desde el punto de vista antropológico, la técnica no es algo ajeno a la naturaleza, sino todo lo contrario: la técnica es la naturaleza específica del hombre (Esparza, 1997).

En ese sentido, instrumental, es en el que evoluciona el concepto de técnica hasta nuestros días, acompañada de los grandes cambios sociales, industriales, políticos y científicos, como refiere el filósofo Heidegger: “*La representación corriente de la técnica, según la cual ella es un medio y un hacer del hombre, puede llamarse,*

por tanto, la definición instrumental y antropológica de la técnica”.

Aceptamos hoy que técnica es el conjunto de procedimientos necesarios para realizar una actividad para la fabricación de bienes, ya sea transformando o creando la materia o también la provisión de servicios. Todo ello precisa de una determinada pericia o capacidad, la existencia de los instrumentos o herramientas necesarios, además de la capacidad de inventar, que surge de la imaginación y la reflexión. Los conceptos técnicos se transfieren, se heredan, de una forma empírica a través de la experiencia y la intuición, lo que genera una especie de “cultura material”. Ortega y Gasset en su “Introducción al curso *¿Qué es la técnica?*” concluye: “*Señores: Sin la técnica el hombre no existiría ni habría existido nunca”.*

Hoy sabemos que la presencia de la técnica en la medicina y las ciencias de la salud proporciona resultados que conforman un diagnóstico más fiable y eficiente gracias a que los avances tecnológicos facultan la automatización y robotización de los procesos y unos sistemas de información, gestión, organización y protocolización capaces de reducir el riesgo y la incertidumbre diagnóstico-terapéutica, aportando grandes avances en la relación, efectividad y significativas mejoras en la toma de decisiones al punto de llegar a desarrollar una actividad sanitaria personalizada, de precisión y excelencia profesional.

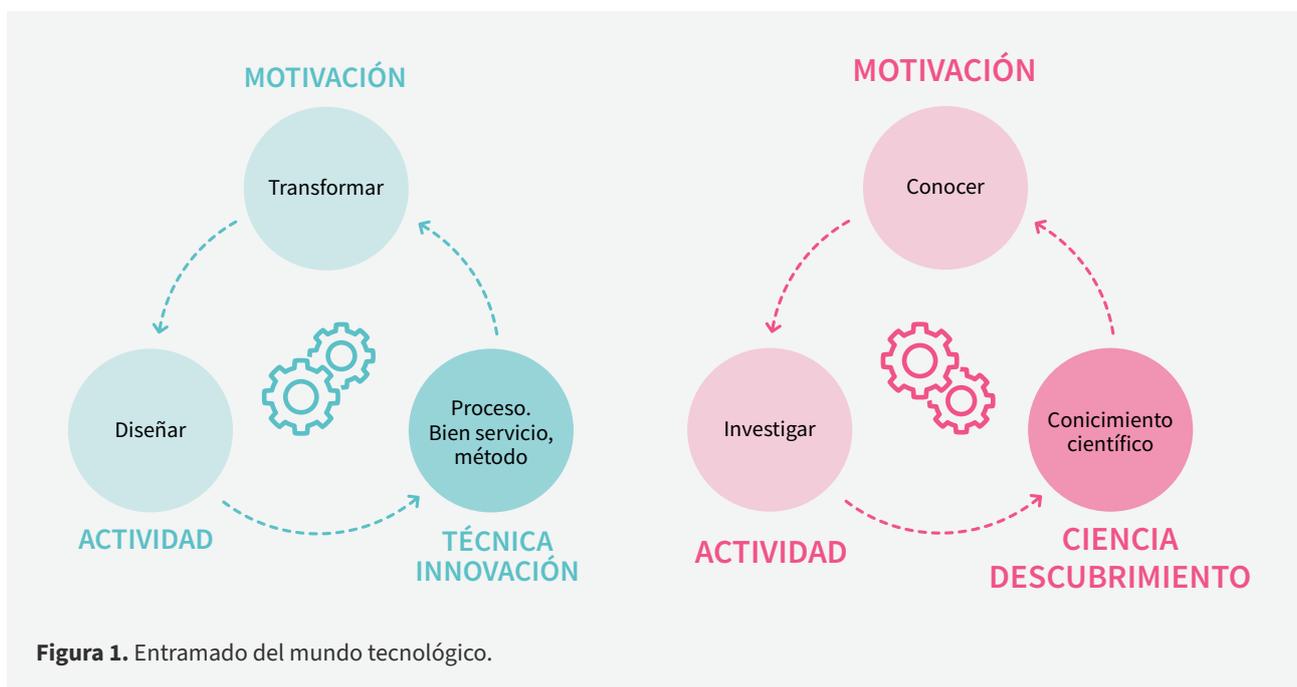


Figura 1. Entramado del mundo tecnológico.

2. SOBRE LA TECNOLOGÍA²

La tecnología resulta de una síntesis, una hibridación, entre los conocimientos científicos y los procesos y conocimientos técnicos. Siendo la técnica un soporte vital de la tecnología, ambos avanzan y mejoran desde una leal convivencia, como refiere Johan Galtung:

Una forma ingenua de entender la tecnología sería considerarla meramente como cuestión de herramientas (equipos) y aptitudes y conocimientos (programas). Claro que estos componentes son importantes, pero constituyen la superficie de la tecnología, como la punta visible del iceberg. La tecnología comprende una estructura conexa, e incluso una estructura profunda: los conocimientos en que se basa constituyen una determinada estructura cognoscitiva, un marco mental, una cosmología social que actúa como un terreno fértil en el que pueden plantarse las semillas de determinados tipos de conocimientos para que crezcan y generen nuevos conocimientos. Para utilizar las herramientas hace falta una cierta estructura del comportamiento. Las herramientas no funcionan en un vacío, las hace el hombre y las utiliza el hombre y para que puedan funcionar requieren determinadas

circunstancias sociales. Incluso una tecnología de la producción totalmente automatizada implica una estructura cognoscitiva y del comportamiento, es decir de distanciamiento del proceso de producción. Por lo general se tiene muy poca conciencia de estas estructuras que acompañan a las tecnologías... hay tendencia a reducir las tecnologías a técnicas.

Por otro lado, la ciencia más ortodoxa, construida sobre valores éticos y estéticos ha ido evolucionando hacia un conocimiento de predominio instrumental y manipulación técnica, renovado mediante la innovación, cuyo objetivo fundamental es alcanzar la eficacia y la eficiencia. El conocimiento, en las nuevas formas de organización social que nos hemos dado adquiere una nueva dimensión instrumental y cultural que hemos incorporado al amplio concepto de las “Sociedades del Conocimiento”.

La tecnología abarca y recoge un conjunto de conocimientos no solo científicos y técnicos sino también económicos, culturales y sociales pues su objetivo es la obtención de productos y la producción de bienes o servicios que buscan bienestar y mejorar la calidad de vida,



TÉCNICA	TECNOLOGÍA
Cómo	Por qué
Conocimientos técnicos y herramientas	Conocimientos científicos, estructura social, infraestructura productiva
Utiliza conocimientos científico	Utiliza conocimiento científico y empírico
Procedimientos	Procesos
Puesta en práctica	Involucra técnicas , conocimientos científicos, empíricos, aspectos económicos y un determinado marco sociocultural
Concepciones técnicas	Teorías tecnológicas

razón por la que no encontramos un consenso universal que defina con claridad técnica y tecnología, pues viven solapadas. De la acumulación de conocimientos técnicos surgieron teorías científicas posteriores; sería el caso de la máquina de vapor y la termodinámica, la ingeniería mecánica y el desarrollo de las matemáticas, las técnicas quirúrgicas y la anatomía o las técnicas analíticas, la biología molecular y el diagnóstico in vitro. La tecnología se nutre no solo de conocimientos científicos puros sino también de las experiencias sobre los medios de producción, la adaptación y aceptación de los productos por el usuario, su utilidad, la eficiencia económica o su “practicabilidad”.

En el caso de la medicina y las ciencias de la salud existe una especial sensibilidad, pues estas tecnologías, especialmente avanzadas, se incorporan no solo como bienes o servicios, sino que llevan implícitas las actitudes de los profesionales que las utilizan, lo hacen en equipo, de forma pluri y multidisciplinar y “centrada en y por el paciente”; es él quien “da sentido” al acto sanitario personalizado. Por lo tanto, en el cuidado de la salud, las “acciones tecnológicas” están vinculadas a una ocupación previa, una pre-ocupación, que resulta de una relación clínica madura, que nunca será axiológicamente neutra, ni podrá estar aislada en una burbuja tecnológica inerte.

En la asistencia sanitaria, la transferencia tecnológica lleva implícita la transferencia de conocimiento y de valores, pues la tecnología sanitaria ha de ser aceptable, fiable, eficiente, equitativa, accesible y personalizada, pues si la técnica apunta al “cómo hacer las cosas”,

la tecnología responde “por qué hacerlo de esa manera “. La segunda suele ser más relevante desde la perspectiva del “para el paciente”. El profesor Aquiles Gay, asesor en tecnología de la UNESCO, centró toda su obra científica sobre la tesis de que la tecnología no debe tener un enfoque puramente técnico, sino que debe ser cultural, social y humanístico:

la tecnología es la suma total de nuestros conocimientos, capacidades y habilidades para resolver problemas técnico-sociales, y abarca todos los medios de que dispone el hombre para controlar y transformar su entorno físico, así como para convertir los materiales que le ofrece la naturaleza en elementos capaces de satisfacer sus necesidades... la tecnología es, por intermedio de los productos tecnológicos (bienes, procesos o servicios), el factor de mediación entre las necesidades y los deseos del hombre y los recursos disponibles... el proceso tecnológico es, en última instancia, un acto de creación. En el caso de la producción de objetos, la tecnología se aproxima más al arte que a la ciencia, vehiculizado por el impulso creador humano, pero a diferencia de la obra de arte... en la que no existe una pre intencionalidad de obtener un resultado determinado de antemano, el objeto tecnológico responde a demandas bien definidas. Es esencialmente utilitario, racional, responde a necesidades y ha sido concebido y realizado mediante una acción concreta... La creación tecnológica es una síntesis -formal- de recursos y conocimientos... pero también es una síntesis -temporal-, pues la tecnología depende del tiempo y sus productos varían fundamentalmente a lo largo del mismo.



3. SOBRE LA TECNOCENCIA

Tras caminar por los territorios de la técnica y la tecnología encontramos un espacio común que conforma un ecosistema de convivencia y progreso denominado tecnociencia. Es un nuevo paradigma y por ello nombra una nueva realidad, una forma de comprender la nueva relación entre el conocimiento científico y los avances técnicos, determinantes, para que surjan las tecnologías que la sociedad recibe y que tienen una relevancia especial cuando su sentido y finalidad es el cuidado de la salud.

Parfraseando al profesor Aranguren cuando refiere que la ética pensada sería la ética teórica y la ética vivida sería la moral, en nuestro caso es el conocimiento científico teórico, la ciencia ortodoxa, lo que podríamos llamar “*ciencia pensada*”, mientras que el conocimiento que se relaciona con la experiencia tecnológica sería la “*ciencia vivida*”.

De esa relación biunívoca surge la tecnociencia como una nueva forma de conocer desde la instrumentalidad. Puede servir de ejemplo la invención del microscopio por el holandés Antoni Leeuwenhoek en 1674. La observación de la naturaleza exigía nuevos instrumentos como lo fueron el termómetro, el reloj de péndulo o el barómetro, pero, en nuestro caso, el microscopio ampliaba el alcance de los sentidos, se veía lo que, existiendo, era invisible. Nos enfrentó ante una nueva idea de lo que significa ver, como refiere Laura J. Snyder : *“A esta nueva idea de lo que significaba ver, la acompañaba una nueva idea de la ciencia, según la cual la percepción sensorial aumentada –no los textos antiguos ni la deducción lógica, ni siquiera la experiencia visual directa– era la base del conocimiento del mundo natural....La cuestión de cómo vemos asumió por primera vez una posición central en la ciencia y se reconsideró radicalmente el sentido de la palabra ver”*.

Sabemos cómo el conocimiento es una especie de mediación para con la verdad, una línea asintótica siempre con el misterio, mientras la tecnociencia se comporta como una nueva forma de conocer caracterizada por el acto de ceder a la invención un lugar en el método científico. Lo distintivo de la tecnociencia es crear o modificar entidades, hacer emerger nuevas realidades dejando atrás la escisión entre ciencia básica y aplicación posterior, pero, sobre todo, porque tiene impacto en la vida cotidiana.

Tecnociencia es pues un término que resulta de la hibridación ciencia-tecnología, resulta de la pérdida o rotura de la frontera tradicional entre *episteme* (ciencia pensada, a manera de conocimiento puro o básico), de *téchne*, que sería la ciencia aplicada, “vivida”. Son conocimientos surgidos desde la destreza y sus aplicaciones técnicas. La tecnociencia supera la brecha que venía existiendo entre el mero conocimiento y la técnica o la instrumentación científica. Es un término que asienta en las últimas décadas del siglo XX, en virtud de las transformaciones ligadas a la que se denominó “Big Science”, la macrociencia.

Es posible conocer más a partir de la observación instrumentalizada y sofisticada que a su vez aporta nuevos conocimientos teóricos, ambas se retroalimentan a manera de feedback. Es el caso de la astrofísica y la astrobiología y en la medicina del siglo XXI podría estar representada por la Medicina Personalizada de Precisión.



La tecnociencia aporta un cambio no solo epistemológico sino también ontológico por cuanto aparecen nuevas entidades y hallazgos con propiedades desconocidas, es el caso de las nanopartículas y la nanotecnología, el desarrollo de microchips, clones celulares, transgénicos, la biología sintética, las nuevas tecnologías de la comunicación, la bioinformática o la biotecnología. Podemos inferir entonces que los actores de la tecnociencia no son solo científicos y tecnólogos, se han de incorporar otros muchos: científicos, ingenieros, gestores, empresarios, inversores, filósofos, juristas y políticos, lo que justifica el gran impacto de la tecnociencia en la vida cotidiana.

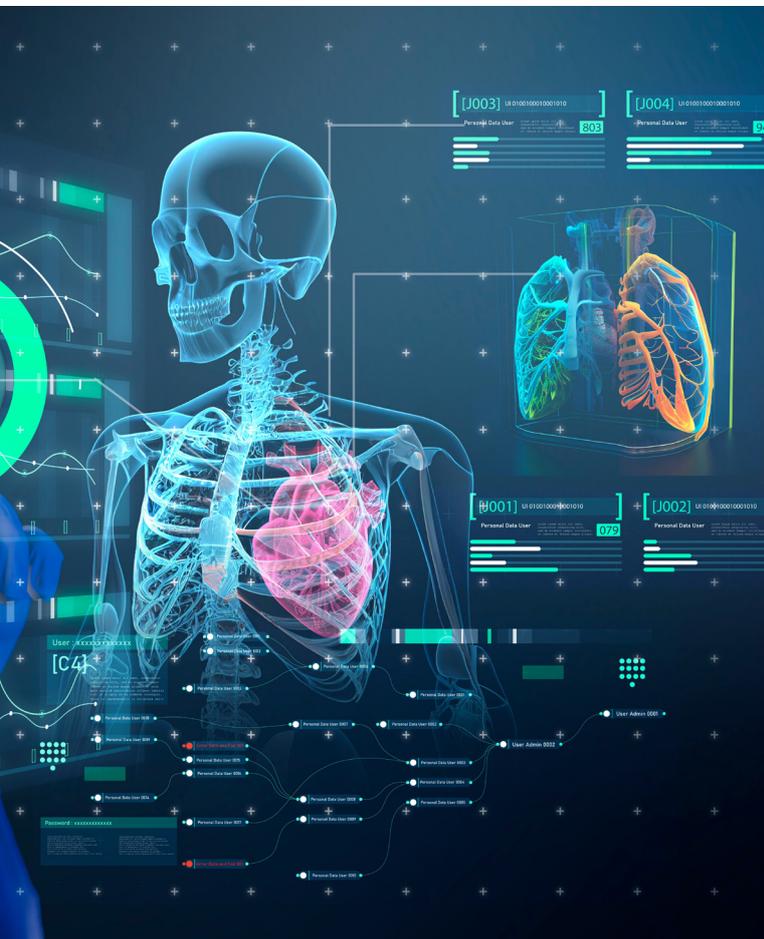
La transformación de la ciencia desde la segunda mitad del siglo XX tiene lugar no solo por los avances del método científico y la técnica, también por los grandes cambios sociales experimentados por la economía, logística, política, estrategia o la legislación. Con todo, la ciencia entra en un nuevo proceso denominado: “*el modo 2*

del conocimiento”; “*ciencia postnormal*”; “*ciencia postacadémica*”, que culmina, en la década de 1980, en la “tecnociencia”, término que permite aunar el componente tecnológico de la investigación, así como la cooperación multi y pluridisciplinar para poder incorporar los denominados valores epistémicos ampliados, como la eficacia, la eficiencia y la aplicabilidad. La tecnociencia aglutina a las ciencias sociales, que también se han tecnologizado, se habla de las “*tecno-acciones*” y de “*tecno-hechos*”, aún más, la complejidad de la tecnociencia exige que la innovación sea uno de sus grandes valores, valor transversal, incluso uno de sus vectores axiológicos.

En el terreno de las ciencias de la salud, la tecnociencia nos plantea algunas reflexiones como resultado de las exigencias de prescriptores y usuarios, que nos lleva a la axiología. Muchos llegan a creer que estamos ante un progreso indefinido de la ciencia a expensas de la imparable innovación tecnológica que nos permite controlar la salud y la enfermedad, viven en una realidad virtual, casi sin relación clínica ni humana. La genética, la biología molecular, o la nanotecnología, a manera de ejemplos, están determinando una visión del cuerpo humano a manera de un sistema dinámico de interacciones moleculares que conduce a una nueva relación entre la sociedad y las ciencias de la salud, sin darse cuenta de que descubrir nuevas formas de conocer a través del uso de la tecnología para salvar la vida y cuidarla, puede ser también una nueva posibilidad y oportunidad para ejercer el nuevo humanismo tecnológico, una expresión renovada de valores como la prudencia, modestia, serenidad y sentido común capaces de evitar la ceguera que provocan la altivez y la soberbia ligadas al poder del conocimiento tecnológico.

La medicina científica de nuestro siglo exige de quienes la ejercen mantenerse capacitados para seguir asombrándose ante los interrogantes de su investigación y saber topar con sus errores, gestionar una adecuada convalecencia tras el fracaso, saber criticar el escepticismo como una forma peculiar de ignorancia y, sobre todo, ante el paciente, saber desarrollar su madurez axiológica y ejercer “*ciencia con conciencia*”.

La tecnociencia y sus tecnologías sanitarias son instrumentos privilegiados para curar y cuidar, capaces hoy también de desarrollar lo que el profesor H. Küng definiera como “*madura y responsable confianza radical*”.



4. SOBRE LA INNOVACIÓN

La innovación era un concepto poco favorable en tiempo de Platón y de Aristóteles, significaba introducir cambios en el “orden establecido por la naturaleza” por lo tanto cambiar las cosas y las costumbres debía estar prohibido: *“no se establecerá la innovación contraria a los precedentes”*, refería Cicerón.

En el Renacimiento, la innovación estuvo asociada con la herejía, sobre todo después de la Reforma Protestante. Eduardo VI, en 1548, emitió una declaración contra los que innovan. Ser innovador era un error, casi un insulto, durante los siglos XVII y XVIII, que se consolidó durante la revolución inglesa de 1649 y la francesa de 1789, al punto de identificar innovador con revolucionario. Era más apropiado identificar las propuestas de lo nuevo como simple novedad o renovación y en el ámbito de las ciencias, en lugar de innovación se hablaba de invento o de “crear una máquina”.

Es en el siglo XIX cuando la palabra innovar adquiere una nueva dimensión y se diferencia de las invenciones, se entiende innovar como *“introducir algo útil en el mundo”*, ligado no solo a la experiencia sino también al uso o aplicación. Fue el economista Joseph Alois Schumpeter (1883-1950) quien describe la innovación como el motor interno para el desarrollo de la economía: lo hace en el marco de su análisis sobre los ciclos económicos y la importancia del empresario en su evolución, que le lleva a identificar cómo, en la vida económica, existe la necesidad de desarrollar nuevas mercancías y demandas. Habla de la innovación como un proceso de *“destrucción creadora”* y argumenta que la creación de innovaciones técnicas y financieras es un medio competitivo en el que se deben asumir riesgos y beneficios, que no siempre se mantienen.

Innovar es mudar o alterar algo, introduciendo novedades. Incluye la creación o modificación de un producto y su introducción en el mercado, por lo que hay muchos caminos para la innovación, sea una nueva mercancía, un nuevo método de producción, abrir un nuevo mercado, una nueva fuente de materia prima o una nueva forma de organización industrial. Es fácil comprender la importancia de la innovación en la tecnología y muy especialmente en las ciencias de la salud si recordamos la importancia de acontecimientos tan relevantes como fabricar sofisticados aparatos diag-

nósticos, instrumentos y robots quirúrgicos, implantes, vacunas, desarrollar nuevos tratamientos médicos o algoritmos para la toma de decisiones.

Innovar es un proceso intelectual complejo que está vinculado a una correcta percepción de la realidad, en el sentido de captar las diversas apariencias que tiene la realidad percibida, sin eludir nuestra toma conciencia de esta y nuestra capacidad de aprendizaje. En el ámbito de la salud son ejemplos de esas realidades los trasplantes de órganos, o la cirugía digital cognitiva, pero también lo sería innovar sobre la nueva y compleja realidad para gestionar, con criterios éticos y legales, el uso de los datos personales (historias clínicas), de biomarcadores moleculares digitalizados para mejorar las pautas terapéuticas o compartir información en los proyectos de investigación biomédica, preservando la seguridad, privacidad e intimidad.

La innovación, hoy de moda y en alza, resulta ser un valor fundamental para el desarrollo de la sociedad y la investigación; necesita ser conocida y comprendida, es algo más que nuevos productos o servicios, resulta de una serie de actividades coordinadas que requieren más tiempo del que pensamos e implican un riesgo muy superior al de otras “actividades productivas”. No olvidemos que la innovación hace hincapié en los procesos y actividades donde es posible actuar y no tanto sobre los resultados, donde ya no caben demasiadas acciones “científicas”, salvo alegrarse o asumir responsabilidades.

La innovación es un proceso muy complejo como ya recogía la definición del Manual de Oslo publicado por la OCDE en 2005: *“la innovación consiste en la introducción de un producto, bien o servicio, o de un proceso, nuevo o significativamente mejorado, o la introducción de un método de comercialización o de organización, nuevo, aplicado a las prácticas de negocio, a la organización del trabajo o a las relaciones externas”*.

La tecnología avanza mediante la invención o la innovación, sería *“una forma de creación”*. Inventamos dispositivos, mecanismos, procedimientos, medios e instrumentos técnicos con un resultado práctico. Cuando las condiciones sociales y económicas posibilitan su producción, uso o difusión, entonces hablamos de innovación. Según Davies (1979) *“la invención es artística y difícil de planificar, en tanto que la tecnología depende esencialmente de la buena planificación y de la aplica-*

“La innovación consiste en la introducción de un producto, bien o servicio, o de un proceso, nuevo o significativamente mejorado, o la introducción de un método de comercialización o de organización, nuevo, aplicado a las prácticas de negocio, a la organización del trabajo o a las relaciones externas”

ción de técnicas conocidas”. Una invención puede pasar a ser útil cuando las condiciones económicas y sociales posibilitan su producción, uso y difusión; en este caso hablamos ya de innovación.

La innovación en el ámbito de las ciencias de la salud incorpora un invento al proceso productivo de curar y cuidar, pues no todas las invenciones se convierten en innovaciones, incluso no todas las innovaciones tienen éxito. Pasar de la invención a la innovación exige la existencia de unas condiciones apropiadas para que se produzca, pues las ideas e inventos se deben corresponder con lo técnicamente posible, ser realizables y satisfacer expectativas sanitarias. La invención pasa a ser innovación cuando se satisfacen los requisitos de accesibilidad, equidad, pertinencia y adecuada difusión. La innovación en salud es *“ella y su circunstancia”*, pues esta última suele ser un puzzle de circunstancias humanas, sociales, políticas, económicas, jurídicas y éticas; sirvan de ejemplo las tecnologías para el diagnóstico in vitro a cabecera del paciente (POCT), los modelos preclínicos de enfermedad o las tecnologías de diagnóstico molecular en la oncología de precisión. Por ello innovar necesita tiempo y su valor es tal, que resulta difícil ponerle precio.

La verdadera innovación sanitaria exige que las ideas pasen desde el laboratorio a la fabricación y tengan un uso social que ha de ser efectivo y eficiente, proceso que en Silicon Valley denominan *“aumento de escala”*.

La innovación sanitaria no debe ser solo un hecho tecnológico sino como refiere la Fundación COTEC: *“todo cambio (no solo tecnológico) basado en conocimiento (no solo científico) que genera valor (no solo económico)”*.

Concluimos este apartado conceptual, aceptando cómo el progreso científico del siglo XXI transcurre determinado por el ritmo que marca la tecnología. Esta es nuestra realidad social. Una realidad que en el ámbito de la Medicina y las Ciencias de la Salud es difícil hace improbable encontrar productos sanitarios que no respondan a procesos de innovación. El progreso científico-sanitario se manifiesta por la existencia y aplicación de nuevas técnicas instrumentales y de nuevas metodologías aplicadas a los complejos procesos del diagnóstico y tratamiento de las enfermedades, pues sabemos que la tecnología se hace *“sanitaria”* en virtud de la finalidad y objetivos que tienen que ver con el cuidado de la salud, curar y cuidar. Por todo ello la tecnología sanitaria es un área de conocimiento claramente diferenciado y especialmente avanzado, no solo debido a su complejidad técnica, o capacidad innovadora sino también por su finalidad socio sanitaria, lo que impide que su quehacer quede restringido a la mera estandarización de procesos diagnósticos o terapéuticos.

Las finalidades sanitarias concretas emergen de las necesidades sociales propias de un contexto de atención y cuidado de la salud gestionado a través de los diferentes sistemas sanitarios y sus modelos, donde las tecnologías sanitarias se incorporan al proceso humanizador de la asistencia sanitaria.

Una vez que hemos sugerido los nuevos elementos conceptuales que nos propone el uso de la tecnología sanitaria, es el momento de acercarnos, en lo que sigue, a dos ejemplos paradigmáticos, como son la salud digital y la incorporación de la IA y sus aplicaciones en la asistencia sanitaria del siglo XXI.



¹ José Javier Esparza en su obra *Curso general de Disidencia. Apuntes para una visión del mundo alternativa*, 1997. Citado a su vez por Omar Montoya Suárez en su artículo: “De la Téchne griega a la técnica occidental moderna”. *Scientia et Technica*, Año XIV, n.º 39, septiembre 2008. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.

² En un mundo inmerso en una tecnología participativa que afecta a todos los campos del conocimiento se tiende a clasificar las tecnologías: las denominadas “duras” que tienen que ver con la transformación de elementos materiales para producir bienes y servicios, como son la biotecnología, la mecánica y la electrónica. Las tecnologías “blandas” se refieren a las actividades de gestión, que permiten conseguir la mejora de bienes y servicios en relación con la organización del trabajo y las instituciones (software, estadística, marketing, etc.). También se distingue entre tecnologías claves, de racionalización, genéricas, de proceso de fabricación, industriales, alternativas, puntas (entre las que destacan biotecnología, nanotecnología y micro tecnología). Otros autores diferencian tecnologías flexibles y fijas, de equipo, de operación, de producto y limpia.



INFORME I

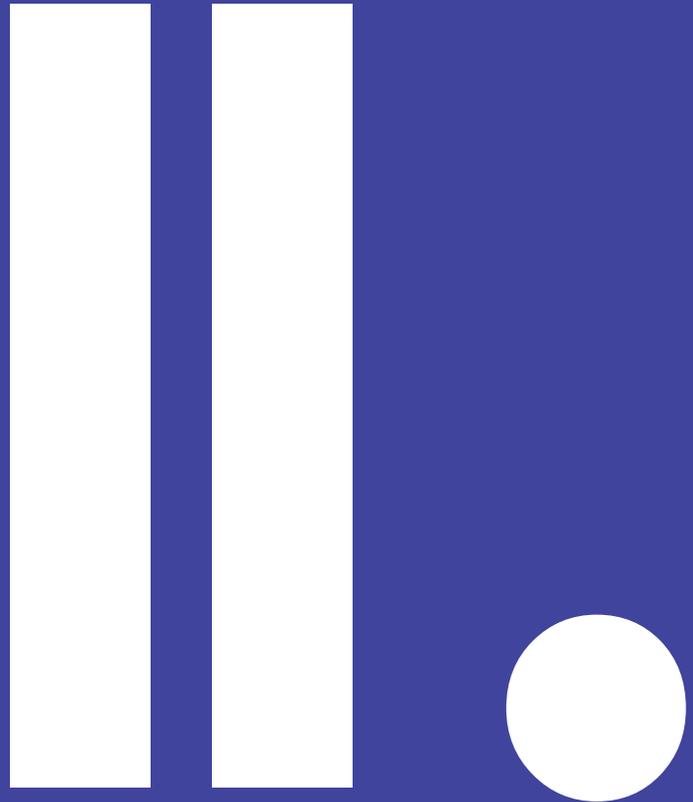
LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

II. La digitalización en procesos clínicos. Sistemas departamentales.

1. Introducción.

2. Casos de uso.

- 2.1 La Digitalización en procesos clínicos.
Servicios de Anatomía Patológica.
- 2.2 La Digitalización en procesos clínicos.
Servicios de Medicina Intensiva.
- 2.3 La Digitalización en procesos clínicos.
Servicios de Cardiología
- 2.4 Referencias



La digitalización
en procesos
clínicos. Sistemas
departamentales.



La digitalización en procesos clínicos. Sistemas departamentales.

1. INTRODUCCIÓN

La digitalización del sistema sanitario ha sido una de las principales palancas de transformación, evolucionando desde simples registros en papel hasta complejas plataformas digitales que abordan desde la gestión de actividad, contabilidad y logística de los centros hasta los complejos procesos asistenciales que requieren de funciones específicas para la toma de decisiones clínicas complejas. Esta evolución no solo ha mejorado la eficiencia operativa, sino que también ha permitido una atención más precisa y personalizada para los pacientes.

El sistema de información asistencial más relevante es la Historia Clínica Electrónica (HCE), ampliamente extendida en España, que actúa como sustrato principal para la gestión de los procesos asociados al cuidado del paciente, aportando la información agregada de los subprocesos específicos por los que transita el paciente durante su enfermedad, así como la documentación de otros episodios anteriores que hayan requerido atención sanitaria. De este modo, la HCE representa un repositorio de información que aporta una visión general de los episodios de enfermedad de los pacientes.



A medida que avanzamos hacia el futuro, es evidente que la implantación de Sistemas de Información Clínicos seguirá siendo una tendencia clave

Sin embargo, la HCE no contempla la especificidad requerida para muchos procesos clínicos que requieren una intensidad o tipología de datos característicos de algunas especialidades médicas, para lo que se requieren sistemas de información clínicos especializados. Así, los primeros Sistemas Departamentales desarrollados fueron los Sistemas de Gestión de Imagen Medica (PACS) y los Sistemas de Información de Laboratorio (LIS) que, desde su función, como servicios centrales, se enfocaron en optimizar la funcionalidad, calidad y eficiencia.

En radiología, por ejemplo, los sistemas de imágenes médicas han avanzado significativamente, permitiendo no solo la captura y almacenamiento de imágenes, sino también su análisis mediante Inteligencia Artificial, lo que mejora la precisión en los diagnósticos. En el laboratorio, los sistemas de gestión de información han optimizado el flujo de trabajo, desde la recolección de muestras hasta la entrega de resultados, garantizando una mayor rapidez y fiabilidad.

Los Sistemas de Información Clínicos (SIC) se han ido extendiendo en la estructura digital de los centros sanitarios principalmente como demanda de los profesionales clínicos ante las evidencias de valor que aportan a sus procesos específicos. Sin embargo, los departamentos de informática de los hospitales no siempre han contemplado a estos sistemas como parte de su estrategia integral de sus sistemas de IT. Esto ha producido un despliegue desigual entre servicios regionales de salud e incluso entre hospitales del mismo sistema.

Este capítulo presenta tres casos de uso de Sistemas de Información Clínicos asociados a los departamentos de Anatomía Patológica, Cuidados Críticos y Cardiología. Son tres casos que nos sirven como ejemplos de uso, donde se describe su funcionalidad y aportaciones de valor clínico.

Hemos pedido a los autores que desarrollen una sección donde describan el nivel de adopción de estos sistemas en España, así como las principales barreras

para su extensión a todos los servicios clínicos de su especialidad. Existen diferencias notables en el nivel de adopción, desde la incipiente implantación de Patología Digital, que permite la digitalización de muestras y la colaboración entre especialistas, mejorando la precisión en los diagnósticos y acelerando el proceso de análisis; los SIC de Cuidados Críticos, con un 40% de adopción aunque la SEMICYUC los considera un estándar de calidad y recomienda su implantación en todos los Servicios de Cuidados Críticos, hasta los SIC de Cardiología, ampliamente extendidos para la gestión de Imagen Cardíaca pero poco integrados entre centros.

El valor que estas soluciones aportan al proceso asistencial es innegable, como documentan los autores. La capacidad de acceder a información precisa y actualizada en tiempo real permite a los profesionales de la salud tomar decisiones más informadas y oportunas, lo que mejora los resultados clínicos y la satisfacción del paciente y de los profesionales. La integración de datos también facilita el seguimiento de tratamientos y la identificación de áreas de mejora, lo que contribuye a un ciclo continuo de optimización en la atención médica.

A medida que avanzamos hacia el futuro, es evidente que la implantación de Sistemas de Información Clínicos seguirá siendo una tendencia clave. La integración de tecnologías emergentes, como la Inteligencia Artificial y el análisis de datos promete revolucionar aún más la forma en que se brinda la atención médica.

En definitiva, la descripción de las aportaciones de los SIC en eficiencia, seguridad de paciente, calidad asistencial y beneficio hacia el paciente y profesionales, descrita de un modo divulgativo, esperamos que sirva de inspiración para las instituciones sanitarias para potenciar la adopción de los SIC en todos los centros mediante la inclusión de estos sistemas en sus planes estratégicos de sistemas de información sanitarios.



2. CASOS DE USO

2.1. La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Anatomía Patológica.

La Anatomía Patológica es la especialidad médica que se encarga del diagnóstico de las enfermedades, sobre la base de la integración de las características morfológicas (imagen médica) y moleculares en muestras tisulares (biopsias) y citológicas. Los principales retos a los que se enfrenta esta especialidad hoy día son el aumento de la demanda (con un incremento de 15% anual en el número de muestras recibidas en la mayoría de los servicios), la mayor complejidad de los informes

(con un creciente número de biomarcadores y detalles diagnósticos, pronósticos y de tratamiento), la escasez de patólogos, la dotación insuficiente de técnicos superiores de anatomía patológica (TEAP), la falta de biólogos moleculares, y la escasa automatización de muchos procesos (como la macroscopía o tallado y la microtomía o el archivo de bloques de parafina y preparaciones).

No es una especialidad de laboratorio. En la práctica clínica, es una especialidad muy cercana a Radiología, con la que comparte y de la que ha heredado muchos procesos de gestión de imagen digital (adquisición, visualización y almacenamiento), sobre todo desde que la norma DICOM también está disponible para Anatomía Patológica.

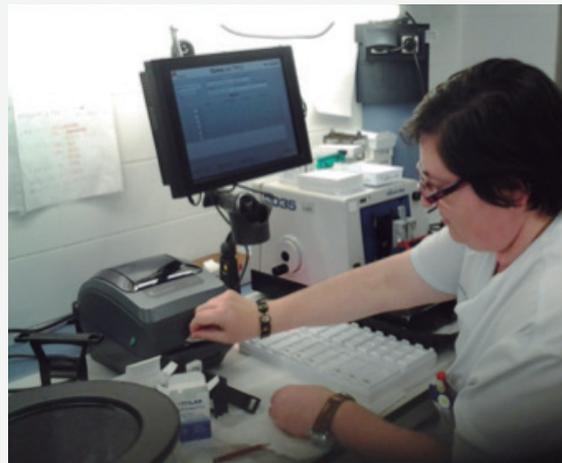
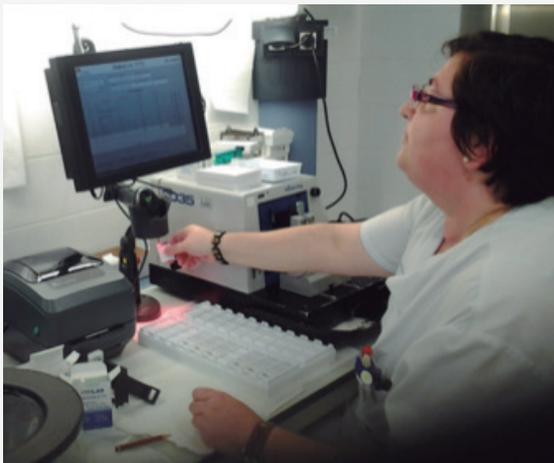


Figura 1. Técnicos de anatomía patológica trabajando con un sistema de trazabilidad.

Fase prediagnóstico

hay procesos del trabajo realizado en Anatomía Patológica que se basa en el trabajo de laboratorio que realizan los TEAP, bajo la supervisión de patólogos. De esta forma, los principales procesos que tienen lugar en esta área, y que se constituyen la fase de “PREDIAGNÓSTICO” son:

- Recepción de muestras (biopsias, piezas quirúrgicas, citologías y estudios moleculares)
- Registro de solicitudes de estudios de anatomía patológica
- Estudio macroscópico (o “tallado”), sobre todo en biopsias y piezas quirúrgicas
- Inclusión en parafina y microtomía, para generar preparaciones histológicas en biopsias, piezas quirúrgicas y bloques celulares en citología
- Tinción convencional de portaobjetos (hematoxilina-eosina [HE] en biopsias y piezas quirúrgicas, Papanicolaou y Giemsa rápido en citologías).
- Técnicas histopatológicas especiales (histoquímica, inmunohistoquímica, hibridación in situ)
- Técnicas moleculares en tejidos y líquidos corporales (PCR, NGS, biopsia líquida, etc.)
- Escaneado de preparaciones histológicas y citológicas para obtener preparaciones digitales tanto en campo claro como en fluorescencia
- Gestión de suministros
- Gestión de calidad

Las principales ventajas de la digitalización de estos procesos son la mayor eficiencia en todos ellos, una mayor seguridad del paciente al identificar correctamente a pacientes y muestras, y una mayor calidad de las técnicas de tinción y moleculares. Las ventajas del uso de preparaciones digitales han sido ampliamente descritas [García Rojo, 2015], destacando la permanencia de la calidad de las imágenes, su coste efectividad y una mejor trazabilidad de todos los procesos, en esta fase prediagnóstico.

Es importante destacar la necesidad de una mayor automatización e, incluso, robotización de procesos de histotecnología (inclusión, microtomía, tinción, montaje de cubreobjetos) [Figura 1], ya que empiezan a surgir soluciones para microtomía totalmente automatizada y robotizada, incluso en la fase de desbastado (alcanzar la zona óptima de corte del bloque de tejido), así como ro-

bots para el manejo y traslado de bloques y de portaobjetos en las distintas fases [Ramón y Cajal Agüeras, 2024]. Todos estos sistemas aportan datos esenciales tanto al sistema de trazabilidad como al SIPAT.

Fase diagnóstico

los productos que se obtienen tras esta fase de “prediagnóstico” y que son entregados al patólogo, para que comience la fase de “DIAGNÓSTICO”, son:

- Datos del sistema de información de anatomía patológica (SIPAT), como:
 - › Filiación de paciente y datos demográficos.
 - › Datos del estudio (tipo de estudio anatomopatológico solicitado, fecha, servicio, etc.).
 - › Datos de la muestra (lugar de la toma, tipo de muestra, descripción macroscópica).
 - › Número de bloques de parafina, preparaciones y tinciones necesarias.
 - › Resultados de técnicas moleculares que se han realizado en bloques de parafina o en muestras que no tienen bloques (p. ej. biopsia líquida).
- Datos clínicos disponibles en la historia clínica electrónica.
- Órdenes de trabajo del sistema de trazabilidad, que las recoge y las transmite para conectar el SIPAT con las estaciones de trabajo de los técnicos (macroscopía, confección de bloques, microtomía) y con los instrumentos automáticos de tinción (teñidores de HE, inmunoteñidores) o instrumentos de biología molecular (termocicladores, secuenciadores).
- Preparaciones convencionales (físicas o en cristal), que precisan de un microscopio óptico para su lectura, aunque algunas (hibridación in situ fluorescente o FISH e inmunofluorescencia directa) requieren un microscopio de fluorescencia.
- Preparaciones digitales, que son examinadas con un visor específico en el ordenador.

El producto final de esta fase es el informe de anatomía patológica, en el que se resumen los principales hallazgos de cada fase, generalmente en los apartados descripción macroscópica, descripción microscópica, diagnóstico final y codificación topográfica y morfológica, así como un apartado opcional de comentarios.



Las principales ventajas de una adecuada digitalización de estos procesos, que incluya una adecuada interoperabilidad entre los diferentes sistemas de información son disponer de una información clínica completa, gestionar eficientemente las peticiones de técnicas de tinción y moleculares controlar los tiempos de respuesta. Las preparaciones digitales permiten utilizar herramientas de cuantificación digital de biomarcadores o algoritmos más complejos de segmentación o de predicción de respuesta a tratamiento, entre otros. También las imágenes macroscópicas pueden verse beneficiadas de algoritmos específicos de procesamiento de imágenes.

Fase postdiagnóstico

una vez validado el informe de anatomía patológica, comienza la fase postdiagnóstico, en la cual intervienen procesos en los que intervienen los patólogos, como la participación en comités multidisciplinares de tumores, la realización de técnicas complementarias según las indicaciones clínicas, la segunda opinión, la inclusión de pacientes en ensayos clínicos, o el registro en bases de datos poblacionales o de investigación.

Pero también hay otros procesos en los que intervienen los técnicos superiores de anatomía patológica (TEAP) como el archivo de productos intermediarios (bloques de parafina o portaobjetos), el control de calidad de las técnicas.

También es sustancial el trabajo realizado por el personal administrativo en el que además de dar apoyo a los procesos de registro y de recopilación de información clínica, es esencial en la notificación y registro de incidencias y en la comunicación con otros servicios y centros.

2.1.1. Descripción de los Sistemas de Información disponibles y su función

Los componentes esenciales de un sistema de patología digital los podemos resumir en:

- Sistema de Información de Anatomía Patológica (SIPAT).
- Sistema de petición electrónica de estudios anatómopatológicos.
- Sistema de trazabilidad de muestras, productos intermedios y archivos.
- Sistema de imagen (fotografías y vídeo) y sonido en macroscopía.

- Escáner de preparaciones histológicas y citológicas.
- Sistema de gestión de imágenes digitales (SGID).
- Visor de imágenes médicas adaptado a preparaciones digitales.
- Sistema de almacenamiento de imágenes (PACS, VNA).
- Patología computacional. Algoritmos de aprendizaje profundo (“deep learning”).

I Sistema de Información de Anatomía Patológica (SIPAT)

El elemento más importante y central de en todo proyecto de patología digital es la herramienta de gestión global del servicio de anatomía patológica o Sistema de Información de Anatomía Patológica (SIPAT). Aunque el resto de los elementos, sobre todo aquellos más directamente relacionados con la imagen, de son también esenciales, el SIPAT debe ser el cimiento sobre el que se desarrollen o desplieguen las demás herramientas.

Las **funcionalidades** mínimas que debe cumplir el SIPAT son:

- 01 Contemplar todos los procesos prediagnósticos (registro, fijación, macroscopía, inclusión), diagnósticos (microscopía, diagnóstico final) y postdiagnósticos (codificación, archivo) que se realizan en el servicio de anatomía patológica.
- 02 Gestión de catálogos y tablas maestras.
- 03 Edición de procesos y subprocesos: Es posible definir los procesos por los que va a pasar cada tipo de muestra.
- 04 Validación de informes parametrizable.
- 05 El envío de los resultados (informes de anatomía patológica) a la historia clínica electrónica debe seguir las especificaciones y normas que indique el equipo TIC corporativo.
- 06 Integración con un sistema de gestión de imágenes.
- 07 Sistema de alertas, con reglas editables.
- 08 Informes y etiquetas definibles y maquetables por el usuario.
- 09 Codificación de muestras, procedimientos, diagnósticos, técnicas mediante SNOMED CT.
- 10 Informes estructurados, según el modelo de IHE Integrating Healthcare Enterprise), el Colegio Americano de Patólogos, Bethesda, o International Collaboration on Cancer Reporting (ICCR).
- 11 Gestión de archivo digital de documentos que se reciban en papel.

- 12 Gestión de muestras. Préstamos, envíos a otros centros para estudios especiales.
- 13 Módulo de búsquedas desarrollado.
- 14 Módulo de estadísticas y cuadro de mando integrado, flexible e intuitivo.
- 15 Gestión de archivos de contenedores o envases de muestras, bloques de parafina y portaobjetos.

El SIPAT debe tener **conectividad y ser interoperable**, siguiendo normas internacionales, con:

- 01 El sistema de trazabilidad, con comunicación bidireccional.
- 02 Los equipos automáticos del laboratorio (inmunteñidores, teñidores automáticos, sistemas de patología molecular de diversos proveedores, incluyendo secuenciadores).
- 03 Impresoras de casetes y portaobjetos.
- 04 Base de datos única de pacientes.
- 05 Integración con base de datos corporativa de médicos y enfermeras (matronas) peticionarios.
- 06 Gestión de usuarios integrada con sistemas de información corporativos de salud (p. ej. LDAP).
- 07 Historia clínica de salud.
- 08 Registro de Cáncer del sistema de salud.
- 09 Sistema de Información de biobanco.
- 10 Sistema de gestión de imágenes digitales (SIPD), compatible con la especificación IHE (Pathology and Laboratory Medicine Technical Framework).
- 11 Sistema de telepatología (consulta remota).

I Sistema de petición electrónica de estudios anatomopatológicos

El sistema de petición electrónica es un módulo que permite la solicitud de estudios anatomopatológicos y sus usuarios son de hospitales y de centros de salud.

Se recomienda que este sistema sea una aplicación independiente del SIPAT, aunque debe estar conectado mediante servicios al módulo principal del SIPAT. Si fuera necesario, el sistema de petición electrónica se podría integrar con otro SIPAT diferente al del proyecto. La mensajería a utilizar en los servicios mencionados será la que se defina por la oficina técnica de interoperabilidad del servicio de salud, para garantizar futuros desarrollos para la gestión de peticiones.

También es recomendable que el sistema peticionario sea específico de anatomía patológica, diferente

al módulo de petición electrónica de laboratorios clínicos o de radiología.

I Sistema de trazabilidad de muestras, productos intermedios y archivos

El sistema de gestión de trazabilidad es aquel que garantiza la seguridad de todo el proceso de una muestra, desde la petición de estudio anatomopatológico hasta su archivo definitivo. Este elemento se compondrá de dos partes, la parte software que compondrá toda la parte lógica de la gestión de los flujos de trabajo y que será regional (para todo el sistema de salud), y una parte hardware que permitirá automatizar todos los procesos de identificación y seguimiento de las muestras y sus productos intermedios (bloques de parafina, portaobjetos, viales de ADN extraído, etc.), incluyendo su lugar de almacenamiento temporal y final.

I Sistema de imagen (fotografías y vídeo) y sonido en macroscopía

Durante el estudio macroscópico, sobre todo en biopsias, piezas quirúrgicas y autopsias, es necesario documentar todos los hallazgos de la muestra o de los órganos a estudiar, incluyendo la realización de fotografía o vídeo digital y la grabación digital de sonido.

El sistema deberá estar integrado en una mesa de tallado con sistema de macrofotografía. Tanto este sistema de imagen como la grabadora digital (utilizada para descripciones macroscópicas, conectado a un sistema de reconocimiento de voz) deben estar integrados con el SGID y el SIPAT.

I Escáner de preparaciones histológicas y citológicas

Las preparaciones digitales se obtienen a partir de esas preparaciones convencionales utilizando un escáner de preparaciones. Estos equipos están diseñados para asumir toda la carga de trabajo diaria de una unidad de anatomía patológica (entre 200 y 1.000 preparaciones al día, habitualmente).

I Sistema de gestión de imágenes digitales (SGID)

El SGID permite organizar las preparaciones digitales, sus metadatos, los datos clínicos y anatomopatológicos esenciales para organizar las sesiones de trabajo de los patólogos y citotécnicos. Permite la gestión y organización de los procesos de acceso, tratamiento y análisis de la imagen digital, tanto macroscópica, como

microscópica (preparaciones digitales y fotografías). Gracias a su integración con el PACS/VNA, el SGPD ofrece un resumen o panorámica de todas las imágenes disponibles (“la bandeja virtual del patólogo”). Debe indicar qué preparaciones ya han sido revisadas, así como las miniaturas de imágenes macroscópicas, obtenidas desde el objeto DICOM LOCALIZER u OVERVIEW de la WSI almacenadas en el PACS.

I Visor de imágenes médicas adaptado a preparaciones digitales

El visor de preparaciones digitales permite trabajar en el ordenador sin necesidad de utilizar los microscopios para realizar los diagnósticos en anatomía patológica. Aun cuando la solución más idónea entendemos que sería un visor único, en la práctica, suele utilizarse dos aplicaciones diferentes, un visor de diagnóstico anatomopatológico (con funcionalidades muy específicas y avanzadas) y otro visor clínico básico independiente para otras especialidades clínicas, generalmente compatible con el mismo visor clínico de imágenes radiológicas.

I Sistema de almacenamiento de imágenes (PACS, VNA)

El principal reto hoy día es el almacenamiento de las preparaciones digitales. Un centro hospitalario que

generase 50.000 preparaciones al año (suponiendo 2 GB cada preparación) [Figura 2], serían necesarios 100 terabytes de espacio de almacenamiento anual para esas preparaciones digitales. Afortunadamente, no toda esa información necesita estar en línea ni disponible en un medio de almacenamiento ultrarrápido. Una vez validados los informes, tras un tiempo de latencia adecuado (menos de 1 mes, generalmente), pueden pasar a un medio de almacenamiento menos costoso.

El almacenamiento de estas imágenes se realiza en un sistema PACS / VNA (*Picture Archiving and Communication System / Vendor Neutral Archive*), compatible con la modalidad DICOM WSI, según el suplemento 222 de DICOM *Whole Slide Microscopy Bulk Annotations Storage SOP Class*. Disponer de DICOM *Conformance Statement* donde se haga referencia la VL *Whole Slide Microscopy Image (WSI)* y al *Structured Report (SR)* de DICOM.

I Patología computacional. Algoritmos de aprendizaje profundo (“deep learning”)

El libro blanco de la SEAP de 2021 recoge las principales aplicaciones de patología computacional (incluyendo machine learning y *deep learning* en anatomía patológica aplicadas a la imagen microscópica [García Rojo, 2021], y que podemos resumir en:

TAMAÑO SECCIÓN EN CÁNCER DE MAMA: 20 mm x 15 mm

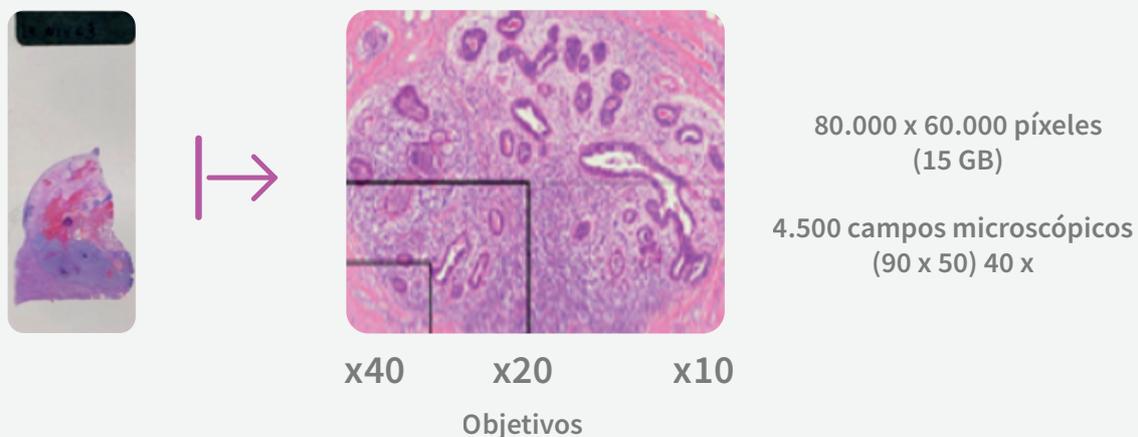


Figura 2. Una sección histológica de cáncer de mama en un portaobjetos escaneado con un objetivo 40x, incluye unos 15 GB de información, que con métodos de compresión eficientes pueden quedar reducidos a menos de 2 GB cada preparación.

- Cribado rápido de estudios anatomopatológico.
- Mejorar la calidad y seguridad del diagnóstico
- Servir de herramienta de segunda opinión y telepatología.
- Predicción de respuesta a tratamientos y pronóstico.
- Tinción digital preparaciones, sin necesidad de reactivo químicos
- Investigación y docencia, control de calidad, certificación y acreditación profesional.

2.1.2. Desarrollo de evidencias y casos donde aportan valor en salud y eficiencia

La transformación digital de anatomía patológica, a través de la optimización de los procesos y mediante el trabajo cooperativo en red [García Rojo, 2015], tiene un potencial impacto en:

- Mejora de la calidad asistencial:
 - › Equidad. Todos los ciudadanos, independientemente de dónde residan, tienen acceso al mejor estudio de patología de sus posibles enfermedades y prevención de las mismas [RCPATH, 2024] [Hanna, 2023].
 - › Mejoras en los tiempos de respuesta de más del 10% solo con patología digital [Vodovnik, 2016]. Con algoritmos de Inteligencia Artificial, esta mejora en tiempos de respuesta puede incrementarse hasta el 30% [Litjens, 2016].
 - › En cuanto a precisión, los algoritmos de IA en patología, en determinadas enfermedades (p. ej. cáncer de mama, pulmón o colorrectal) consiguen mejor exactitud y precisión que los patólogos generales, y similar al de patólogos expertos [Jiang, 2020].
 - › Efectividad asistencial. Se estima que actualmente el patólogo invierte un 15% de su tiempo en tareas de búsqueda de preparaciones convencionales u hojas de solicitudes [Ghaznavi, 2013], que se evitan con la transformación digital.
 - › Integración con la Historia Clínica Digital del paciente. Además de reducir los tiempos de diagnóstico anatomopatológica, esta integración es esencial para reducir errores y mejorar la presentación de los pacientes en los comités de tumores o comités multidisciplinares [Nobori, 2022].
 - › Disminución de repeticiones de pruebas. El uso combinado de patología digital y algoritmos de IA permite disminuir en más de un 85% los errores humanos y evitar repetir pruebas de forma innecesaria [Shafi, 2023].
- › Desarrollo de la medicina personalizada y de precisión [Bera, 2019].
- Desarrollo Profesional: sub-especialización, aprendizaje, formación [Hanna, 2023].
- Mejora de la organización sanitaria: centros de referencia, servicio en Red (superespecialistas que puede estar localizados en cualquier centro). La organización puede acumular el conocimiento de los patólogos más especializados en ciertas áreas [García Rojo, 2015] [Ardon, 2024].
- Generación y difusión de conocimiento [Hanna, 2024]:
 - › Generación, retención y capitalización del conocimiento.
 - › Socialización o democratización del conocimiento: acceso a la imagen por otros profesionales y pacientes.
 - › Fomento de I+D+i.
- Mayor visibilidad y posición competitiva:
 - › Foco de atracción de profesionales que quieran participar en este nuevo modelo de transformación digital [Martínez-Ciarpaglini, 2022].
 - › Internacionalización (establecimiento de redes nacionales e internacionales, prestación de servicios a terceros) [García Rojo, 2016].
- Impacto en la Sostenibilidad del Sistema Sanitario:
 - › Asistencial: la Red permite garantizar un servicio especializado de alta calidad a pacientes de todo el Sistema y con menores tiempos de respuesta, así como el desarrollo de nuevos servicios (asistenciales y de investigación). Algunos indicadores específicos que pueden incluirse en estudios de coste-eficiencia, son [Ardon, 2024]:
 - Reducción del coste por estudio, tras optimizar los circuitos de trabajo y el número de técnicas especiales o moleculares a realizar.
 - Disminuir el tiempo de respuesta diagnóstica. Es decir, reducir el tiempo que transcurre desde la petición electrónica de estudio anatomopatológico hasta disponer del informe final en la historia clínica del paciente. Además, es posible medir el impacto en el intervalo entre primer síntoma y tratamiento de la enfermedad.



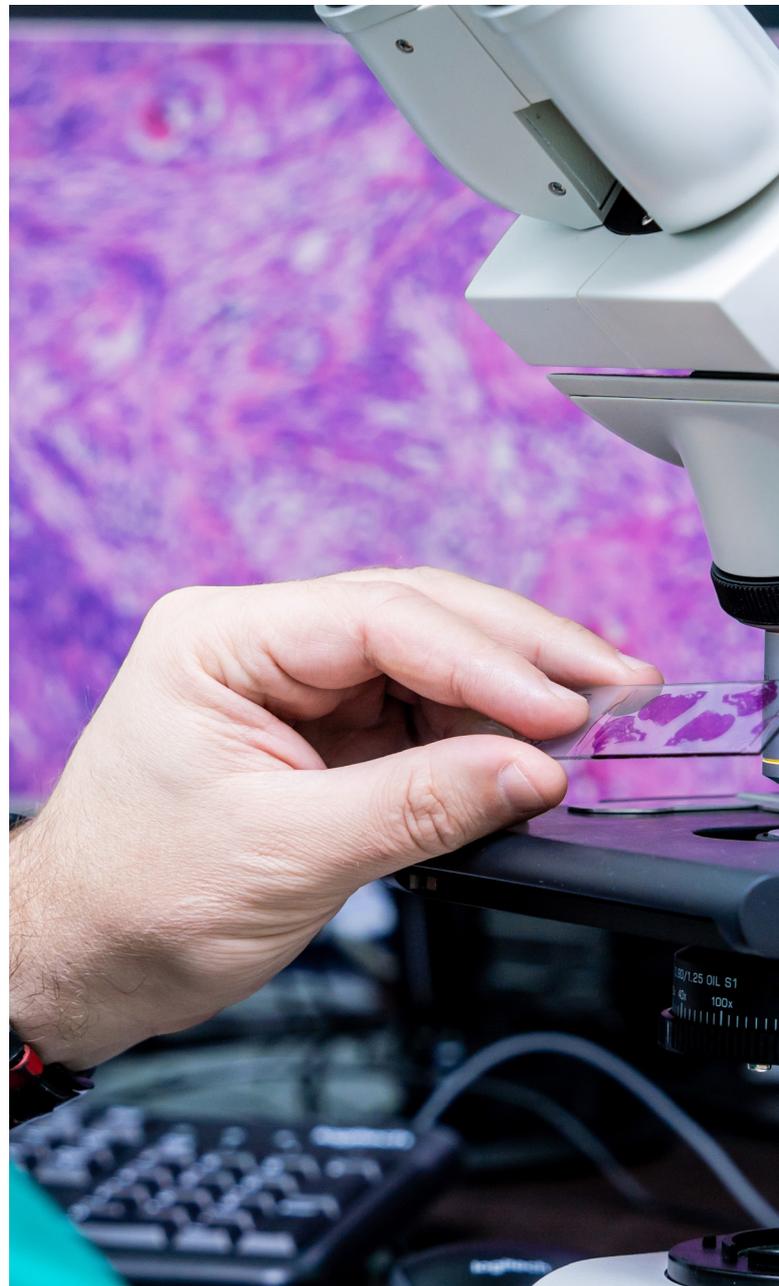
- Minimizar el tiempo necesario para una consulta de segunda opinión diagnóstica entre centros distintos de la misma red y con centros externos.
- Mejor estratificación de paciente de cáncer, en la estrategia de medicina personalizada y de precisión, y poder disponer de los datos necesarios para estudios de sensibilidad y especificidad de los diagnósticos anatomopatológicos y estudios de resultados en salud, centrados en el ciudadano.
 - › Económica: mejora en la eficiencia de los recursos que permiten incrementar la productividad y redistribuir recursos (ej.: menor consumo de recursos humanos en tareas automatizables; menor coste de reposición de equipamiento al estar basado en sistemas estándares, etc.). También son esperables impactos en la reducción de listas de espera, en estancias hospitalarias y en el número de consultas externas. Y, en tercer lugar, se evita costes de sobretreatmento y errores en la interpretación de biomarcadores en cáncer. Hot et al calcularon ahorros en torno a 12,4 millones de dólares en 5 años, para 20 hospitales [Ho, 2014] [Ardon, 2024].
 - › Sostenibilidad de la solución: La mejora en la calidad de diagnóstico y en efectividad, permiten abordar la renovación tecnológica necesaria [Piya, 2023]

En general, la validación del uso de IA o de algoritmos de patología computacional para su uso clínico requiere evaluar, de forma concienzuda, su exactitud, reproducibilidad y rendimiento en diversas circunstancias (p. ej. con preparaciones histológicas o citológicas de diversos centros), así como un estudio de riesgo-beneficio y un análisis de costes, así como definir cuál es el valor mínimo de eficiencia o rendimiento que vamos a aceptar [García Rojo, 2021].

Aún estamos en una fase muy inicial, en la que la Inteligencia Artificial se vislumbra como una herramienta más del patólogo, con el fin de realizar de las tareas más penosas y repetitivas y mejorar la eficiencia de los patólogos, ayudando en los conceptos de «patología de precisión» y medicina personalizada. No requiere grandes cambios legislativos, pues la responsabilidad final es del patólogo.

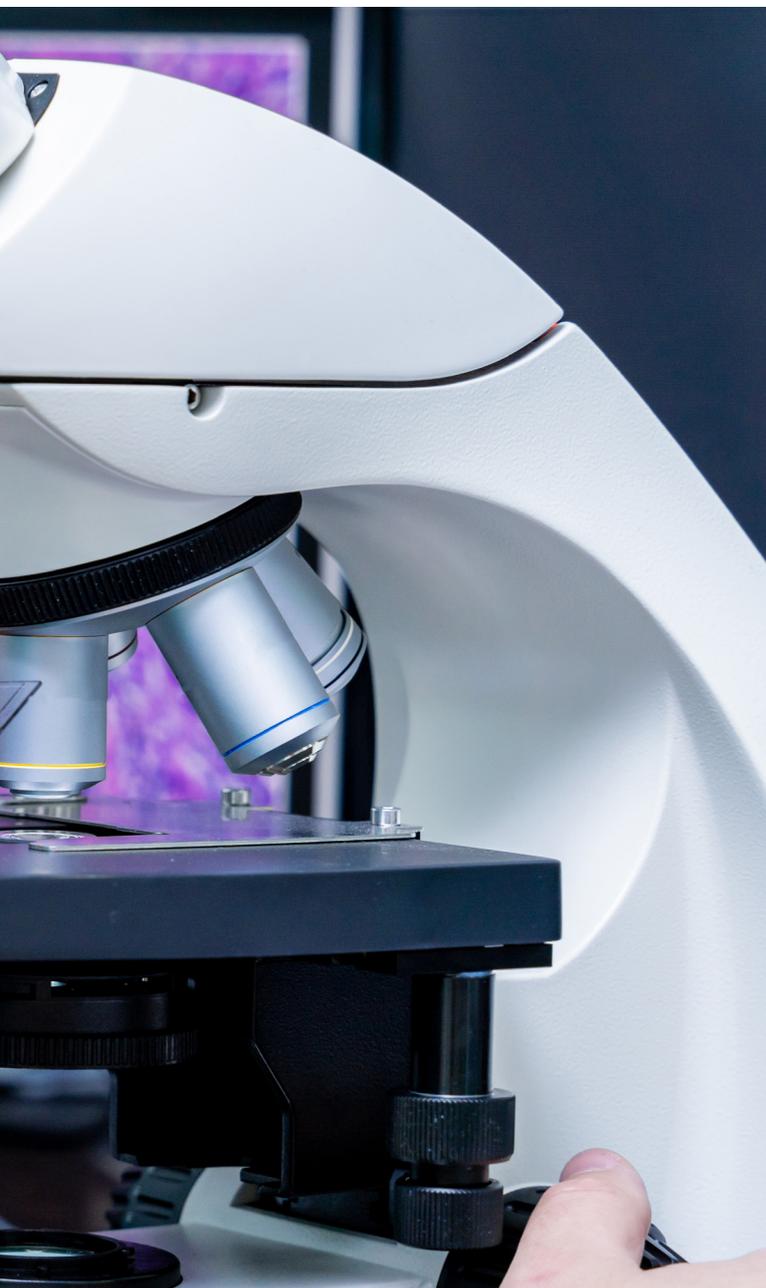
2.1.3. Nivel de adopción de estas tecnologías

En España, hay unos 20 centros que realicen un diagnóstico de toda la patología quirúrgica y biopsias (histopatología) mediante patología digital, y que, de forma real, han completado el proceso de reemplazar el microscopio convencional por el ordenador, al menos en esta área de la especialidad. El centro con más experiencia es la UGC Intercentros Provincial de Granada, con cuatro hospitales trabajando en red. Otros centros pioneros han sido la red de Hospitales Quirón, coordinados por el Hospital Universitario Fundación Jiménez



Díaz de Madrid, y el proyecto DigiPatICS del Instituto Catalán de Salud (ICS). En el resto de Europa, destacan las experiencias de LabPON y el Centro Médico Universitario de Utrecht en Holanda, los Hospitales Universitarios de Leeds en Reino Unido, la Tirol Kliniken en Austria y el Hospital Cannizzaro de Catania en Italia.

Hasta la fecha, no hay descrita ninguna iniciativa similar de digitalización completa que también integre la citopatología, aunque recientemente se han desarrollado nuevos escáneres de preparaciones especialmente diseñados para citología.



Respecto al uso de algoritmos de Inteligencia Artificial, existen unos 10 productos comerciales que cumplen con la Directiva 98/79/EC de diagnóstico in vitro (CE-IVD), que ya ha sido reemplazada por la regulación EU 2017/746 de (CE-IVD-R) [García Rojo, 2021]. En la práctica clínica el grado de implantación es escaso, siendo los más frecuentemente usados los algoritmos para cuantificación de biomarcadores en cáncer de mama o para inmunoterapia (PD-L1) y sistemas para detección y graduación de cáncer de próstata.

2.1.4. Barreras para el despliegue de los sistemas de información

El principal motivo para el desigual desarrollo de la transformación digital en anatomía patológica entre las diferentes comunidades autónomas, en España, es la escasa prioridad que se asigna a estos proyectos, quedando relegados por detrás de otros proyectos clínicos o corporativos, como los de eficiencia energética. En algunos casos, no es una barrera presupuestaria, pues al ser un proyecto de transformación digital, la patología digital y computacional encaja muy bien en los fondos europeos destinados a estos objetivos, pero la disponibilidad de recursos humanos para la redacción de pliegos, es la principal barrera que obliga a tomar decisiones sobre qué proyectos son los que se priorizan.

Aquellas comunidades autónomas que tienen un plan estratégico bien definido para medicina de precisión que incluye anatomía patológica son las que más han desarrollado la patología digital y, en paralelo, ha desarrollado también un proyecto global de genómica y patología molecular, que se ha puesto a disposición de todos los centros asistenciales y no solo para grandes centros de investigación o centros de referencia.

La patología digital requiere una fuerte inversión inicial en escáneres, estaciones de trabajo con monitores de alta calidad y almacenamiento. Con un coste aproximado de unos 2-3 millones de euros por cada millón de habitantes (según los componentes incluidos y el uso o no de algoritmos de IA en patología), los beneficios clínicos que se obtienen hacen que estas inversiones sean coste-eficientes [Ho et al, 2014] [Ardon, 2024] [García Rojo, 2015].

Hay otras barreras que, a menudo, se asocian con el uso de IA en anatomía patológica [García Rojo, 2021]:

- Es necesario disponer de un sistema completo de patología digital. Es posible que, muy pronto, la necesidad de disponer de algoritmos de IA sea el motivo principal llevar a cabo la transformación digital en esta especialidad.
 - Una barrera tecnológica más que debemos superar.
 - Escasa legislación o normas nacionales e internacionales, incluyendo una consideración bioética especial (p. ej. en el uso de grandes volúmenes de datos).
 - Eliminar puestos de trabajo o sustituir puestos especializados por otros más generalistas.
 - Menor desafío intelectual y menores oportunidades de tener experiencia en casos complicados o que requieran un pensamiento crítico.
 - Las nuevas generaciones que adoptarán esta tecnología convertirán la especialidad en una práctica del uso de herramientas de IA.
- Es necesario un gran volumen de imágenes anotadas para que un algoritmo funcione correctamente y en patología hay un volumen pequeño de imágenes bien anotadas.
 - Si en casos difíciles no hay acuerdo entre patólogos, ¿cómo es posible entrenar redes neuronales adecuadamente?
 - ¿Cómo conseguir miles de imágenes para entrenar estos algoritmos con autorización de los pacientes?
 - *Deep learning* es una caja negra en la que no es posible conocer cómo se ha obtenido un resultado.
 - Se requiere gran capacidad de computación para entrenar los algoritmos de deep learning.
- Todos estos potenciales riesgos o barreras en el uso de IA pueden verse superados si consideramos las pruebas científicas que demuestran que la colaboración entre el hombre y la máquina mejora el rendimiento de ambos.

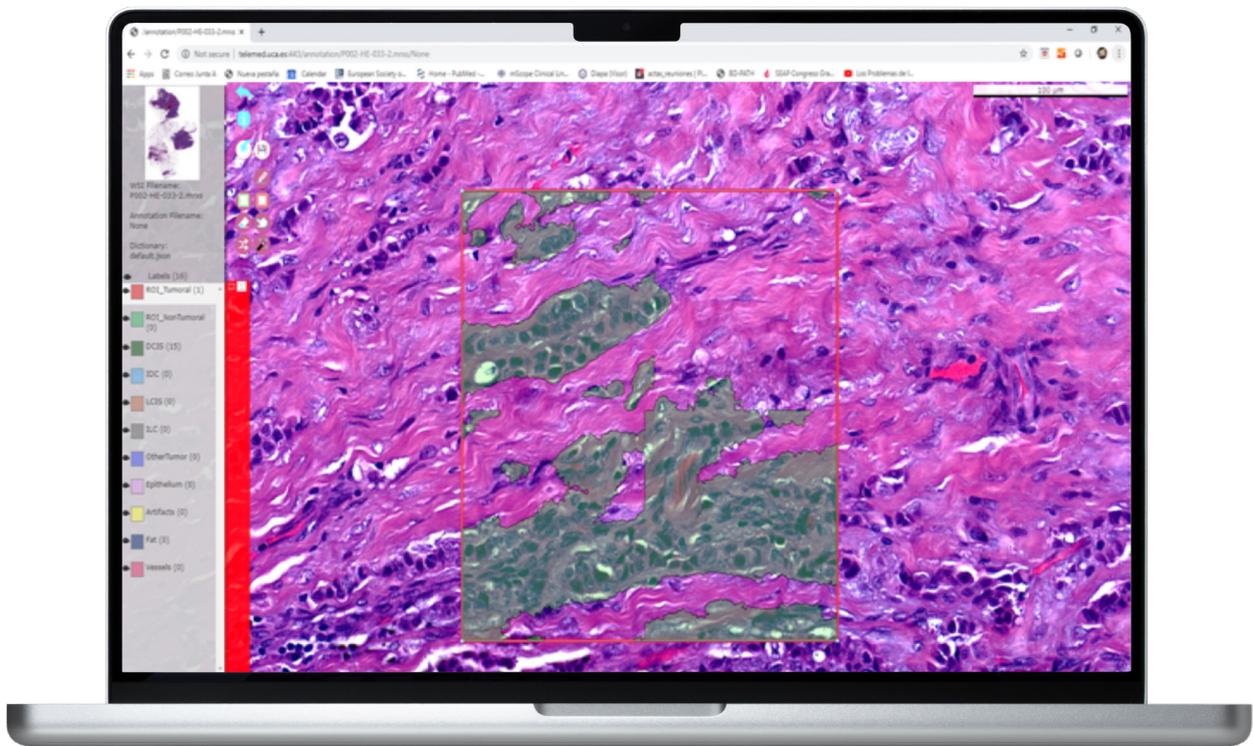


Figura 3. Detección automática de áreas de carcinoma en un corte histológico de cáncer de mama con un algoritmo basado en deep learning [Priego-Torres, 2020].

2.1.5. Tendencias y visión

La patología digital, incluyendo el uso de algoritmos de IA, tendrá el siguiente impacto en salud [García Rojo, 2015]:

Rendimiento:

- Mejorar la productividad. En Granada, se observó una mejora del rendimiento de 21% en la validación de informes anatomopatológicos [Retamero, 2020].
- Es posible centralizar la relación de algunas técnicas especiales.
- Equilibrar más equitativamente las cargas de trabajo entre los patólogos.
- Los casos más complejos pueden ser asignados directamente a patólogos especializados. Disminuir los tiempos de segunda opinión.
- Realizar reuniones vía web (redes de telepatología) que eviten desplazamientos para alcanzar un consenso en el diagnóstico.
- Ergonómicamente puede ser la única opción para que patólogos con problemas de salud puedan seguir trabajando como patólogos.
- El número de algoritmos para preparaciones digitales crece continuamente.
- Eficiencia en el flujo de trabajo:
- La integración con el SIAP evita errores de identificación de muestras y posible pérdida de datos.
- Tras un entrenamiento adecuado, la navegación por la preparación puede ser muy efectiva, comprobado que no se quedan áreas sin revisar.
- Es posible ver múltiples preparaciones simultáneamente.
- Facilitar el acceso a casos de referencia que sirven para comprobar diagnósticos de sospecha.
- Las herramientas de ayuda al diagnóstico (detección de área sospechosa de tumor) y a la cuantificación de biomarcadores o de mitosis son algunas de las aplicaciones que mejoran la eficiencia y la calidad del diagnóstico.
- Es más eficiente revisar las preparaciones digitales con residentes durante la validación de los casos, sobre todo cuando el patólogo tiene su cargo más de un residente. Los residentes pueden revisar posteriormente las anotaciones realizadas durante la validación.

- Accesibilidad y equidad:
- Mejor acceso a servicios de patología y a técnicas complejas en lugares con pocos recursos
- Facilitar el acceso a expertos o servicios muy especializados a lugares remotos que no disponen de servicio de anatomía patológica.
- Evitar los costes y los retrasos al utilizar servicios de mensajería para enviar preparaciones para diagnóstico primario o segunda opinión.
- Evitar posibles pérdidas o daños en el transporte de preparaciones convencionales, que son muy frágiles.

2.1.6. Conclusiones

La complejidad de la labor del patólogo y de los técnicos de anatomía patológica se ha incrementado en las últimas décadas, con la necesidad de examinar tejidos en situaciones especiales (tratamientos neoadyuvantes en cáncer), analizar muchos biomarcadores de manera objetiva, realizar informes pormenorizados (estructurados), compartir ciertas imágenes con otros patólogos en casos de difícil interpretación, y también con otros miembros de los comités multidisciplinares para tomar decisiones para individualizar tratamiento, y finalmente analizar un número ingente de datos morfológicos y moleculares para un mejor diagnóstico [Matias Guiu, 2020].

La transformación digital es imprescindible para abordar todos estos desafíos clínicos y científicos, en los que es esencial disponer de forma integrada de múltiples fuentes de datos, modernizar esos flujos de trabajo con una orientación hacia la seguridad en la atención al paciente, mejorar la colaboración intra e interdepartamental, ayudar al responsable final de comunicar al paciente los hallazgos anatomopatológicos, abordar la falta de patólogos en nuestro entorno y conseguir ahorro en costes asociados al rendimiento de los profesionales y la reducción de errores médicos [Niazi, 2019].

Los principales impactos esperados de la transformación digital en anatomía patológica son la mejora en la calidad asistencial, el desarrollo profesional (subespecialización), contribuir a una organización de salud moderna, donde el trabajo en red es una realidad, generación y difusión de conocimiento dentro de la organización e impulsando la I+D+i, ofrecer una mayor visibilidad y posición competitiva y contribuir de forma significativa en la sostenibilidad del sistema de salud.



2.1.7. Referencias

- Ardon O, Asa SL, Lloyd MC, Lujan G, Parwani A, Santa-Rosario JC, Van Meter B, Samboy J, Pirain D, Blakely S, Hanna MG. Understanding the financial aspects of digital pathology: A dynamic customizable return on investment calculator for informed decision-making. *J Pathol Inform.* 2024 Apr 10; 15:100376.
- Bera K, Schalper KA, Rimm DL, Velcheti V, Madabhushi A. Artificial intelligence in digital pathology - new tools for diagnosis and precision oncology. *Nat Rev Clin Oncol.* 2019 Nov;16(11):703-715.
- Betmouni S. Mitigating inequalities in digital pathology. *The Royal Collage of Pathologists.* 17 Octubre 2024. Disponible en: <https://www.rcpath.org/resource-report/mitigating-inequalities-in-digital-pathology.html>
- García Rojo M, Conde AF, Ordi J, Ruiz Martín J, Corominas JM, Álvarez Alegret R, Alfaro L, Gatus S, Matias Guiu X, de Álava E, Ramírez J. Guía práctica para la implantación de la patología digital. Libro Blanco de la Anatomía Patológica en España 2015. SEAP. Disponible en: <https://seap.es/documents/10157/1546214/2015/LBAP-2015-Recommendaciones-del-Club-de-Patologia-Digital.pdf>
- García-Rojo M. International Clinical Guidelines for the Adoption of Digital Pathology: A Review of Technical Aspects. *Pathobiology.* 2016;83(2-3):99-109.
- García Rojo M. Aplicaciones de deep learning, un método de Inteligencia Artificial, en anatomía patológica. Libro Blanco de la Anatomía Patológica en España 2021. SEAP. 2021:33-62. Disponible en: <https://seap.es/actualidad/noticias/177-libro-blanco-de-la-anatomia-patologica-en-espana-2021>
- Ghaznavi F, Evans A, Madabhushi A, Feldman M. Digital Imaging in Pathology: Whole-Slide Imaging and Beyond. *Annu. Rev. Pathol. Mech. Dis.* 2013. 8:331-59.
- Hanna MG, Ardon O. Digital pathology systems enabling quality patient care. *Genes Chromosomes Cancer.* 2023 Nov;62(11):685-697.
- Ho J, Ahlers SM, Stratman C, Aridor O, Pantanowitz L, Fine JL, Kuzmishin JA, Montalto MC, Parwani AV. Can digital pathology result in cost savings? A financial projection for digital pathology implementation at a large integrated health care organization. *J Pathol Inform.* 2014 Aug 28; 5:33.
- Jiang Y, Yang M, Wang S, Li X, Sun Y. Emerging role of deep learning-based artificial intelligence in tumor pathology. *Cancer Commun (Lond).* 2020 Apr ;40(4):154-166.
- Litjens, G., Sánchez, C., Timofeeva, N. et al. Deep learning as a tool for increased accuracy and efficiency of histopathological diagnosis. *Sci Rep* 2016; 6: 26286.
- Martínez-Ciarpaglini C, Agustí J, Alfaro-Cervello C, Terrádez L, Alarcón L, Gomez J, Ferrández A. Anatomía Patológica para el estudiante de Medicina: videotutoriales con integración de Patología digital como una valiosa herramienta para hacer la asignatura más práctica y atractiva. *Rev Esp Patol.* 2022 Apr-Jun;55(2):85-89.
- Matias Guiu X, García Rojo M. Incorporación de la Patología Digital en la práctica de Anatomía Patológica. *Informática y Salud* 2020; 140: 6-9.
- Niazi MKK, Parwani AV, Gurcan MN. Digital pathology and artificial intelligence. *Lancet Oncol.* 2019 May;20(5):e253-e261.
- Nobori A, Jumniensuk C, Chen X, Enzmann D, Dry S, Nelson S, Arnold CW. Electronic Health Record-Integrated Tumor Board Application to Save Preparation Time and Reduce Errors. *JCO Clin Cancer Inform.* 2022 Jan;6: e2100142.
- Piya S, Lennerz JK. Sustainable development goals applied to digital pathology and artificial intelligence applications in low- to middle-income countries. *Front Med (Lausanne).* 2023 May 15; 10:1146075.
- Priego-Torres, B.M. Sanchez-Morillo, D. Fernandez-Granero, M.A. Garcia-Rojo, M. Automatic segmentation of whole-slide H&E stained breast histopathology images using a deep convolutional neural network architecture *Expert Syst Applicat* 2020; 151: 113387.
- Ramón y Cajal Agüeras S, Mayordomo Aranda E, Treserra Casas F, de la Oliva Varea M. Análisis de la anatomía patológica en España. SEAP 2024. Disponible en: https://www.seap.es/Noticias/2024/Informe_Ana%CC%81lisis_de_la_Anatomi%CC%81a_Patolo%CC%81gica_en_Espan%CC%83a_feb24.pdf
- Retamero JA, Aneiros-Fernandez J, Del Moral RG. Complete Digital Pathology for Routine Histopathology Diagnosis in a Multicenter Hospital Network. *Arch Pathol Lab Med.* 2020 Feb;144(2):221-228.
- Shafi S, Parwani AV. Artificial intelligence in diagnostic pathology. *Diagn Pathol.* 2023 Oct 3;18(1):109.
- Vodovnik A. Diagnostic time in digital pathology: A comparative study on 400 cases. *J Pathol Inform.* 2016 Jan 29:7:4.



2.2. La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Medicina Intensiva

La Medicina Intensiva se ocupa de los pacientes con disfunción actual o potencial, de uno o varios órganos, que representa una amenaza para sus vidas y son susceptibles de recuperación. Requiere un manejo continuo de los pacientes, incluyendo la monitorización, el diagnóstico y el soporte de las funciones vitales afectadas, así como el tratamiento de las enfermedades que provocan dicho fracaso y obliga a la atención inmediata al paciente en cualquier ámbito donde se encuentre. La declaración de Santander establece que su objetivo es ofrecer a los enfermos críticos una atención sanitaria ajustada a sus necesidades, de calidad y de la manera más segura posible, garantizando que sea adecuada, sostenible, ética y respetuosa con su autonomía.

Son ámbitos de actuación de la Medicina Intensiva, los Servicios de Medicina Intensiva (SMI) constituyendo el último escalón asistencial de un sistema de atención progresiva a los pacientes gravemente enfermos y configurándose como una especialidad horizontal o transversal al resto de especialidades. Su función es proporcionar una atención sanitaria centrada en las necesidades del paciente crítico y su familia, ofrecien-

do excelencia clínica y un trato humanizado, pero en un entorno altamente tecnificado. La práctica de la Medicina Intensiva ha incorporado la idea innovadora de que la atención anticipada, el trabajo en equipo multidisciplinar, la comunicación efectiva y la práctica colaborativa con profesionales de otras especialidades, es la base de una atención sanitaria óptima para los pacientes en situación crítica o con posibilidad de evolucionar hacia ella.

La Unidad de Cuidados Intensivos (UCI) es el espacio donde ingresan los pacientes críticos y se define como una organización de profesionales sanitarios que ofrece asistencia multidisciplinar en un espacio específico del hospital, que cumple unos requisitos funcionales, estructurales y organizativos, de forma que garantiza las condiciones de seguridad, calidad y eficiencia adecuadas para atender pacientes que, siendo susceptibles de recuperación, requieren soporte respiratorio o que precisan soporte respiratorio básico junto con soporte de, al menos, dos órganos o sistemas; así como todos los pacientes complejos que requieran soporte por fallo multiorgánico. La World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine hace referencia a un sistema organizado de prestación de cuidados a pacientes críticos con equipos médicos y de enfermería especializados, con alta capacidad de monitorización y





sistemas de soporte para mantener la disfunción y fallo orgánico que ponen en riesgo la vida del paciente. Aunque una UCI se encuentra en un área geográfica definida de un hospital, sus actividades a menudo se extienden más allá de las paredes del espacio físico para incluir el servicio de urgencias, la sala de hospitalización convencional y el seguimiento postUCI.

Una evolución reciente de la MI es el concepto de servicio extendido de medicina intensiva (SEMI) que basado en una medicina crítica preventiva busca identificar de forma precoz a los pacientes en riesgo de deterioro fuera del área de UCI y su tratamiento precoz, de forma colaborativa con otras especialidades.

La medicina intensiva, constituye uno de los principales componentes de los sistemas sanitarios modernos, con una demanda creciente y un gasto sanitario proporcionalmente elevado, por lo que deben justificar ante la sociedad su eficiencia clínica y económica. La gestión adecuada de los recursos y la medición de costes es fundamental para el análisis del funcionamiento y el desempeño en un SMI. No existen muchos estudios que analicen la epidemiología de los pacientes ingresados en los SMI, aunque un estudio reciente muestra el

interés de caracterizar dicha población.

El número de camas de intensivos es variable y heterogéneo a nivel internacional. Datos recientes muestran una amplia variabilidad entre diferentes regiones y países con una media de 8,7 camas UCI por 100.000 h, situándose España en una posición intermedia. En Europa, se mantiene la variabilidad entre países con 11,5 camas de UCI por 100.000 habitantes. En un estudio publicado por la Sociedad Española de Medicina Intensiva Crítica y Unidades Coronarias (SEMICYUC) (Martín et al 2013) el 71% de las camas disponibles en las unidades de críticos de adultos en España, eran dependientes de los SMI, la mayoría polivalentes. En ese estudio el número total de camas de críticos de adultos identificadas fue de 4.738 (10,3/100.000 habitantes). Durante la pandemia el número de pacientes críticos se incrementó de forma exponencial obligando a aumentar los recursos y expandiendo las camas de UCI en casi el 60%. En la actualidad, según datos disponibles en 2022 en España hay un total de 6314 camas de UCI en funcionamiento (5.159 públicas y 1155 privadas); 5.054 (4127 públicas y 1155 privadas) excluyendo las camas de coronarias, neonatología, pediatría y quemados.

2.2.1. Sistemas de información clínica

Los SMI constituyen un área sanitaria muy especializada con numerosos dispositivos que generan multitud de datos y registros de los pacientes ingresados, llegando hasta más de 1.300 datos por enfermo y día de estancia. Esto les convierte en los entornos naturales para la aplicación de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) y la disponibilidad de voluminosas bases de datos.

El empleo de Sistemas de Información Clínica (SIC) en los SMI busca mejorar los resultados finales del proceso asistencial, mejorando la seguridad y la calidad, y colaborando en la mejor gestión de los SMI. La SEMICYUC considera que los SIC constituyen un estándar de calidad recomendando su implantación en los SMI.

Los requisitos funcionales básicos deben contemplar la integración con los datos administrativos del paciente, la prescripción farmacológica, la integración a los dispositivos de monitorización y soporte (ventiladores, equipos de depuración extrarrenal, monitorización específica, gasómetros, bombas de perfusión, entre otras), la generación de alarmas y avisos, la gráfica, el uso de técnicas, los cuidados de enfermería, las notas clínicas e informes, la disponibilidad de guías y planes, la codificación, así como la plena integración con datos de laboratorio, microbiología y radiodiagnóstico.

Estos requisitos técnicos, de formación y funcionales que estos SIC deben cumplir para alcanzar sus objetivos, así como el análisis de datos y de seguridad están definidos en la literatura. A destacar la privacidad y protección de datos médicos del paciente, la usabilidad del software, alta capacidad de integración, y la disponibilidad 24x7x365.

Además, debe permitir la explotación autónoma de los datos con la generación de informes automáticos y cuadros de mando que permitan su uso para la mejora en la asistencia, la investigación, la gestión clínica y la evaluación de la calidad. Se considera el interés de disponer de dispositivos móviles que faciliten la atención a los pacientes en diferentes ubicaciones físicas. Estos SIC deben estar completamente integrados en los SIC hospitalarios asegurando la continuidad asistencial de los pacientes antes del ingreso y al alta de UCI.

Los SIC departamentales en UCI permiten resumir la situación clínica del paciente sustituyendo las clásicas “gráficas de papel” con información recogida de manera manual por los profesionales, pero además pueden identificar pacientes en riesgo (incluso fuera de las paredes de la UCI) y servir como fuente de información para la toma de decisiones. Además de la asistencia, la disponibilidad de fuentes de datos y su presentación en informes periódicos permiten información procesable para la gestión, la docencia, la investigación y los procesos de mejora, constituyendo un elemento esencial en la evaluación comparativa.

El concepto de UCI inteligente (Smart ICU) se ha desarrollado recientemente pudiendo disponer de pantallas de alta funcionalidad que integran diferentes fuentes de información y presentan los datos según las necesidades (Smart display); concentrando los datos de todos los equipos 100% explotables para crear modelos predictivos e investigación, pudiendo integrar también las alarmas e imágenes de videograbación (Smart date) o integrando la arquitectura e infraestructura del entorno (domótica, iluminación circadiana, monitorización de alarmas sonoras, control de puertas automáticas, etc. (Smart building)

2.2.2. Nivel de adopción en España de soluciones departamentales de críticos

El estudio de mercado 2024, publicado por FE-NIN, sobre la actividad relacionada con la adquisición de equipamiento y sistemas indica que existen actualmente unas 2.000 camas de UCI que disponen de SIC, lo que indica un nivel de cobertura con esta tecnología del 40% del total de camas gestionadas por Medicina Intensiva. Esta implantación sería todavía menor en otras unidades de críticos como las camas de reanimación, la UCI de pediatría o neonatología. Datos no publicados recogidos a partir de un cuestionario en 90 UCI Españolas en 2018, muestran que el 61,8% de las UCI disponen de SIC con una conectividad a los dispositivos variable siendo las más frecuentes la monitorización (98%) y los ventiladores (83,7%) y menos frecuente con otros dispositivos como las bombas de perfusión (57%) o monitores de presión intracraneal (43%). El nivel de integración con farmacia, laboratorio y microbiología también es variable, aunque se ha ido incrementando de forma progresiva en los últimos años.



2.2.3. Impacto de los SIC y la digitalización

En 1999, el informe del Instituto de Medicina (IOM) “Errar es humano” promovía el uso de nuevas tecnologías para reducir los errores médicos, y posteriormente el informe de 2001 “Crossing the quality chiasm” abogaba por utilizar las TIC como clave en la transformación y el cambio del entorno sanitario para lograr una asistencia mejor y más segura.

La digitalización en el ámbito sanitario ha demostrado mejorar la seguridad, reducir la tasa de errores y eventos adversos, mediante su prevención, facilitando una respuesta más rápida después de que haya ocurrido el evento adverso mitigando el daño y facilitando su identificación y el aprendizaje del sistema. En el año 2009, un estudio en Texas ya demuestra como los hospitales con historia clínica electrónica, órdenes médica informatizadas y ayudas a la toma de decisiones tienen una menor tasa de eventos adversos, menor mortalidad y menores costes.

Una revisión amplia en el ámbito hospitalario y atención primaria incluyendo diferentes intervenciones (órdenes médicas electrónica, herramientas de apoyo a la toma de decisiones, prescripción electrónica, administración medicación mediante código de barras; dispensación automática de medicación, sistemas de gestión de datos de paciente entre otras) concluye que la tecnología de la información mejora la seguridad de los pacientes, reduciendo los errores de medicación, las reacciones adversas farmacológicas y mejorando el cumplimiento de las guías de práctica clínica.

Una revisión sistemática y metaanálisis sobre los sistemas de prescripción electrónica mostró que el paso del papel al sistema electrónico se asoció a una reducción del 85% en las tasas de error en la prescripción de medicamentos y a una reducción del 12% en las tasas de mortalidad en la UCI sin demostrar una reducción en los días de estancia ni mortalidad hospitalaria. Aunque existen publicaciones que muestran cómo pueden aparecer otro tipo de errores de medicación como la selección del paciente, prescripciones repetidas o problemas técnicos.

Los sistemas de trazabilidad del medicamento en UCI incluyen entre sus elementos la prescripción electrónica y los sistemas de soporte a la decisión clínica, así como bombas inteligentes con librerías de fármacos

estandarizados conectados con la prescripción. Estos sistemas han demostrado reducir de forma significativa los errores de medicación, así como mejorar la eficiencia y calidad de la atención sanitaria.

Pero no solo ha demostrado su beneficio en el uso seguro del medicamento sino en otras áreas como la ventilación mecánica, el paciente neurocrítico, el control glucémico, los errores diagnósticos, o la reducción del riesgo de enfermedad tromboembólica. Otras funcionalidades son una mejor gestión de las alarmas reduciendo la sobreexposición de los profesionales y el riesgo de errores relacionados con la “fatiga por alarmas” o la incorporación de herramientas de apoyo para la toma de decisiones clínicas favoreciendo la adherencia a las guías de práctica clínica y favoreciendo una gestión de la atención prestada más efectiva y segura. Además, permite monitorizar pacientes potencialmente críticos en otras áreas fuera de la UCI.

Los SIC mejoran la eficiencia y satisfacción de los profesionales permitiendo la extracción automática de datos e indicadores de calidad para la mejora de los procesos, eliminando la necesidad de la introducción de datos manual y ahorrando tiempo a los profesionales.

La incorporación de la Inteligencia Artificial en los SIC abre nuevos retos en el futuro aportando numerosas funcionalidades para la asistencia, docencia, investigación y gestión, pero a la vez importantes desafíos éticos y legales para su implementación.

Recientemente ya se ha desarrollado bases de datos con un formato común longitudinal abiertas que permite armonizar los datos de la historia clínica electrónica y ser utilizados para la investigación clínica.

2.2.4 Barreras para el despliegue de los Sistemas de Información Clínica en UCI

La implementación de los SIC en las UCI representa una transformación fundamental en la atención a pacientes críticos. Sin embargo, su adopción enfrenta múltiples barreras, especialmente en el ámbito técnico y usabilidad que puede influir en la satisfacción de los usuarios.

Estudios recientes han mostrado las barreras y los factores que pueden impulsar el uso de la tecnología en el ámbito sanitario. Como principales barreras para

la adopción de la tecnología de forma integral y holística por parte de los profesionales sanitarios destacan los problemas técnicos y de infraestructura, las barreras psicológicas y la carga de trabajo. Por el contrario, la formación, la evaluación de la percepción de utilidad y la voluntad de uso por parte de los profesionales sanitarios, impulsarían el uso de la tecnología en este ámbito.

Aunque se han realizado avances importantes en la adquisición, integración y capacidad de almacenamiento de datos, todavía es necesario incorporar otros avances informáticos, de ingeniería biomédica, del procesamiento de señales y de algoritmos de diagnóstico de eventos que únicamente se pueden recoger de forma computarizada. Adquirir, sincronizar, integrar y analizar los datos de los pacientes críticos sigue siendo un reto y una necesidad

Existen barreras organizacionales con resistencia al cambio por parte de los profesionales o falta de compromiso de la dirección; barreras tecnológicas por interoperabilidad limitada con dificultad de integrar los diferentes sistemas y equipamientos y problemas técnicos por fallos en la infraestructura y conectividad; barreras humanas relacionadas con la sobrecarga de trabajo y la usabilidad; barreras legales relacionadas con el manejo y almacenamiento de información médica muy sensible y barreras económicas no solo de implementación sino de mantenimiento que limitan la expansión de los SIC departamentales.

Los retos principales pasan por crear bases de datos fiables, colaborativas y accesibles; la integración de equipos y sistemas capaces de transferir la información en tiempo real y, la incorporación de perfiles profesionales que permitan trabajar los sistemas de IA y los datos de forma interdisciplinar. Además deben buscarse soluciones que sean costes eficientes y permitan su implantación de manera generalizada en los diferentes entornos. Existe ya ejemplos de proyectos colaborativos para compartir bases de datos en el ámbito del paciente crítico.

La formación de los profesionales y las competencias digitales constituyen elementos esenciales para la implementación adecuada de estas soluciones tecnológicas.

2.2.5 Conclusiones

Los Servicios de Medicina Intensiva y en concreto las Unidades de Cuidados Intensivos constituyen el último eslabón asistencial en la atención de los pacientes más graves. En los últimos años el concepto de medicina preventiva crítica ha extendido la actuación de los equipos de intensivos fuera de las paredes de la UCI, buscando modelos de atención precoz que permiten identificar pacientes en riesgo de deterioro. La atención de los pacientes críticos se basa en la monitorización y soporte de la disfunción orgánica, lo que genera un número muy elevado de datos.

Los sistemas de información clínica se han ido incorporando como uno de los equipamientos tecnológicos fundamentales en las UCI permitiendo la integración de muchos de los datos disponibles desde la monitorización, a la integración de otros equipamientos, laboratorio, radiología o microbiología. Estos sistemas convierten los datos en información relevante para la toma de decisiones a nivel asistencial pero también para la gestión, docencia e investigación. Su introducción ha demostrado reducir los incidentes relacionados con la seguridad del paciente, con impacto relevante en los resultados del paciente, mejorando la satisfacción de los profesionales al hacer más eficiente su trabajo y mejorando la comunicación. Estos sistemas permiten también monitorizar de forma remota pacientes en otras áreas fuera de UCI.

A pesar de que su uso se ha extendió de forma progresiva y la mayoría de UCI disponen de SIC, el nivel de integración y operatividad es todavía muy heterogéneo. Además, existen barreras organizativas, culturales, tecnológicas, legales y económicas entre otras que limitan que estos SIC puedan desarrollarse ofreciendo su máxima potencialidad. La formación de los profesionales sanitarios en competencias digitales y en la usabilidad de los sistemas es fundamental, así como la incorporación de perfiles tecnológicos en el ámbito del enfermo crítico.

En la actualidad otros retos como la incorporación de la Inteligencia Artificial y el desarrollo de bases de datos compartidas incluso a nivel internacional van a facilitar la investigación a tiempo real y una medicina crítica más personalizada, segura y eficiente.



2.2.6 Referencias

- **1** Programa de formación Medicina Intensiva. https://www.sanidad.gob.es/areas/profesionesSanitarias/formacionEspecializada/consejoNacional/docs/Medicina_Intensiva.pdf
- **2** World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine; Federación Panamericana e Ibérica de Sociedades de Medicina Crítica y Terapia Intensiva; European Society of Intensive Care Medicine; Sociedad Española de Medicina Intensiva, Crítica y Unidades Coronarias; Société de Réanimation de langue Française. Santander Statement: Intensive Care Medicine. Patient-centered care for the critically ill. (2012),b <https://semicyuc.org/2012/06/declaracion-de-santander-2012/>
- **3** Junta Directiva de SEMICYUC. Medicina intensiva en España. *Med Intensiva*. 2011;35(2):92-101.
- **4** Estándares y recomendaciones 2010 del Ministerio de Sanidad y Política Social para Unidades de Cuidados Intensivos <https://www.sanidad.gob.es/areas/calidadAsistencial/excelenciaClinica/docs/UCI.pdf>
- **5** Marshall JC, Bosco L, Adhikari NK, et al. What is an intensive care unit? A report of the task force of the World Federation of Societies of Intensive and Critical Care Medicine. *J Crit Care*. 2017;37:270-276. doi:10.1016/j.jcrc.2016.07.015
- **6** Needham DM, Davidson J, Cohen H, Hopkins RO, Weirner C, Wunsch H, et al. Improving long-term outcomes after discharge from intensive care unit: Report from a stakeholders' conference. *Crit Care Med*. 2012;40:502-9.
- **7** Glover G, Metaxa V, Ostermann M. Intensive Care Unit Without Walls. *Crit Care Clin*. 2024 Jul;40(3):549-560. doi: 10.1016/j.ccc.2024.03.002. Epub 2024 Apr 16. PMID: 38796227.
- **8** Martín Delgado MC, Gordo-Vidal F. La calidad y la seguridad de la medicina intensiva en España. Algo más que palabras [The quality and safety of intensive care medicine in Spain. More than just words]. *Med Intensiva*. 2011 May;35(4):201-5. Spanish. doi: 10.1016/j.medin.2011.02.003. Epub 2011 Mar 16. PMID: 21414688.
- **9** Moin EE, Seewald NJ, Halpern SD. Use of Life Support and Outcomes Among Patients Admitted to Intensive Care Units. *JAMA*. 2025 Apr 14:e252163. doi: 10.1001/jama.2025.2163. Epub ahead of print. PMID: 40227733; PMCID: PMC11997855.
- **10** Sen-Crowe B, Sutherland M, McKenney M, Elkbuli A. A Closer Look Into Global Hospital Beds Capacity and Resource Shortages During the COVID-19 Pandemic. *J Surg Res*. 2021 Apr;260:56-63. doi: 10.1016/j.jss.2020.11.062. Epub 2020 Nov 24. PMID: 33321393; PMCID: PMC7685049.
- **11** Rhodes A, Ferdinande P, Flaatten H, Guidet B, Metnitz PG, Moreno RP. The variability of critical care bed numbers in Europe. *Intensive Care Med*. 2012 Oct;38(10):1647-53. doi: 10.1007/s00134-012-2627-8. Epub 2012 Jul 10. PMID: 22777516.
- **12** Martín MC, León C, Cuñat J, del Nogal F. Recursos estructurales de los Servicios de Medicina Intensiva en España [Intensive care services resources in Spain]. *Med Intensiva*. 2013 Oct;37(7):443-51. Spanish. doi: 10.1016/j.medin.2013.06.002. Epub 2013 Sep 5. PMID: 24011639.
- **13** Vidal-Cortés P, Martín MC, Díaz E, Bodí M, Igeño JC, Garnacho-Montero J. Impact of one year of pandemic on Spanish Intensive Care Units. *Rev Esp Quimioter*. 2022;35(4):392-400. doi:10.37201/req/025.2022
- **14** https://www.sanidad.gob.es/estadEstudios/estadisticas/docs/TablasSIAE2022/2022_INFORME_ANUAL_SIAE.pdf
- **15** Johnson AE, Pollard TJ, Shen L, Lehman LW, Feng M, Ghassemi M, Moody B, Szolovits P, Celi LA, Mark RG. MIMIC-III, a freely accessible critical care database. *Sci Data*. 2016 May 24;3:160035. doi: 10.1038/sdata.2016.35. PMID: 27219127; PMCID: PMC4878278.
- **16** Hernández-Tejedor A, Peñuelas O, Sirgo Rodríguez G, Llopart-Pou JA, Palencia Herrejón E, Estella A, Fuset Cabanes MP, Alcalá-Llorente MA, Ramírez Gallego P, Obón Azuara B, Lorente Balanza JA, Vaquerizo Alonso C, Ballesteros Sanz MA, García García M, Caballero López J, Socias Mir A, Serrano Lázaro A, Pérez Villares JM, Herrera-Gutiérrez ME. Recommendations of the Working Groups from the Spanish Society of Intensive and Critical Care Medicine and Coronary Units (SEMICYUC) for the management of adult critically ill patients. *Med Intensiva*. 2017 Jun-Jul;41(5):285-305. English, Spanish. doi: 10.1016/j.medin.2017.03.004. Epub 2017 May 2. PMID: 28476212.
- **17** Ros Navarret R. Information technology in critical care: An opportunity to improve our health care. *Enferm Intensiva (Engl Ed)*. 2020 Oct-Dec;31(4):206-207. English, Spanish. doi: 10.1016/j.enfi.2019.02.001. Epub 2019 Jun 22. PMID: 31235208.
- **18** Gómez Tello V, Alvarez Rodríguez J, Núñez Reiz A, et al. Estándares técnicos y funcionales, y proceso de implantación, de un sistema de información clínica en unidades de cuidados intensivos [Technical and functional standards and implementation of a clinical information system in intensive care units]. *Med Intensiva*. 2011;35(8):484-496. doi:10.1016/j.medin.2011.07.001
- **19** Bodí M, Blanch L, Maspons R. Clinical information systems: An opportunity to measure value, investigate and innovate from the real world. *Med Intensiva*. 2017 Jun-Jul;41(5):316-318. English, Spanish. doi: 10.1016/j.medin.2016.10.007. Epub 2016 Dec 23. PMID: 28024907.
- **20** Halpern NA. Innovative designs for the smart ICU: part 1: from initial thoughts to occupancy. *Chest*. 2014 Feb;145(2):399-403. doi: 10.1378/chest.13-0003. PMID: 24493512.
- **21** Kohn LT, Corrigan JM, Donaldson MS. To Err Is Human [Internet] [[cited 2000]]. Available from: <http://www.nap.edu/catalog/9728>
- **22** Crossing the Quality Chasm [Internet] [[cited 2001]]. Available from: <http://www.nap.edu/catalog/10027>
- **23** Bates DW, Gawande AA. Improving safety with information technology. *N Engl J Med*. 2003;348(25):2526-2534. doi:10.1056/NEJMsa020847
- **24** Amarasingham R, Plantinga L, Diener-West M, Gaskin DJ, Powe NR. Clinical information technologies and inpatient outcomes: a multiple hospital study. *Arch Intern Med*. 2009 Jan 26;169(2):108-14. doi: 10.1001/archinternmed.2008.520. PMID: 19171805.



- **25** Alotaibi YK, Federico F. The impact of health information technology on patient safety. *Saudi Med J*. 2017 Dec;38(12):1173-1180. doi: 10.15537/smj.2017.12.20631. PMID: 29209664; PMCID: PMC5787626.
- **26** Prgomet M, Li L, Niazkhani Z, Georgiou A, Westbrook JI. Impact of commercial computerized provider order entry (CPOE) and clinical decision support systems (CDSSs) on medication errors, length of stay, and mortality in intensive care units: a systematic review and meta-analysis. *J Am Med Inform Assoc*. 2017 Mar 1;24(2):413-422. doi: 10.1093/jamia/ocw145. PMID: 28395016; PMCID: PMC7651905.
- **27** Smith JA Jr. Role of computerized physician order entry systems in facilitating medication errors. *J Urol*. 2005 Oct;174(4 Pt 1):1400-1. PMID: 16145448.
- **28** Meknassi Salime G, Bhirich N, Cherif Chefchaoui A, El Hamdaoui O, El Baraka S, Elalaoui Y. Assessment of Automation Models in Hospital Pharmacy: Systematic Review of Technologies, Practices, and Clinical Impacts. *Hosp Pharm*. 2025 Feb 27:00185787251315622. doi: 10.1177/00185787251315622. Epub ahead of print. PMID: 40026489; PMCID: PMC11869230.
- **29** Peine A, Hallawa A, Bickenbach J, Dartmann G, Fazlic LB, Schmeink A, Ascheid G, Thiemermann C, Schuppert A, Kindle R, Celi L, Marx G, Martin L. Development and validation of a reinforcement learning algorithm to dynamically optimize mechanical ventilation in critical care. *NPJ Digit Med*. 2021 Feb 19;4(1):32. doi: 10.1038/s41746-021-00388-6. PMID: 33608661; PMCID: PMC7895944.
- **30** Soun JE, Chow DS, Nagamine M, Takhtawala RS, Filippi CG, Yu W, Chang PD. Artificial Intelligence and Acute Stroke Imaging. *AJNR Am J Neuroradiol*. 2021 Jan;42(1):2-11. doi: 10.3174/ajnr.A6883. Epub 2020 Nov 26. PMID: 33243898; PMCID: PMC7814792.
- **31** Meknassi Salime G, Bhirich N, Cherif Chefchaoui A, El Hamdaoui O, El Baraka S, Elalaoui Y. Assessment of Automation Models in Hospital Pharmacy: Systematic Review of Technologies, Practices, and Clinical Impacts. *Hosp Pharm*. 2025 Feb 27:00185787251315622. doi: 10.1177/00185787251315622. Epub ahead of print. PMID: 40026489; PMCID: PMC11869230.
- **32** Schiff GD, Bates DW. Can electronic clinical documentation help prevent diagnostic errors? *N Engl J Med*. 2010 Mar 25;362(12):1066-9. doi: 10.1056/NEJMp0911734. PMID: 20335582.
- **33** Managing Alarms in Acute Care Across the Life Span: Electrocardiography and Pulse Oximetry. *Crit Care Nurse*. 2018 Apr;38(2):e16-e20. doi: 10.4037/ccn2018468. PMID: 29606686.
- **34** Nibbelink CW, Young JR, Carrington JM, Brewer BB. Informatics Solutions for Application of Decision-Making Skills. *Crit Care Nurs Clin North Am*. 2018 Jun;30(2):237-246. doi: 10.1016/j.cnc.2018.02.006. Epub 2018 Apr 4. PMID: 29724442; PMCID: PMC5941940.
- **35** Bodí M, Claverias L, Esteban F, Sirgo G, De Haro L, Guardiola JJ, Gracia R, Rodríguez A, Gómez J. Automatic generation of minimum dataset and quality indicators from data collected routinely by the clinical information system in an intensive care unit. *Int J Med Inform*. 2021 Jan;145:104327. doi: 10.1016/j.ijmedinf.2020.104327. Epub 2020 Nov 4. PMID: 33220573.
- **36** Gutierrez G. Artificial Intelligence in the Intensive Care Unit. *Crit Care*. 2020 Mar 24;24(1):101. doi: 10.1186/s13054-020-2785-y. Erratum in: *Crit Care*. 2024 Mar 21;28(1):94. doi: 10.1186/s13054-024-04856-9. PMID: 32204716; PMCID: PMC7092485.
- **37** Almagharbeh WT. The impact of AI-based decision support systems on nursing workflows in critical care units. *Int Nurs Rev*. 2025 Jun;72(2):e13011. doi: 10.1111/inr.13011. Epub 2024 Jul 8. PMID: 38973347.
- **38** Rojas JC, Lyons PG, Chhikara K, Chaudhari V, Bhavani SV, Nour M, Buell KG, Smith KD, Gao CA, Amagai S, Mao C, Luo Y, Barker AK, Nupnau M, Hermsen M, Koyner JL, Beck H, Baccile R, Liao Z, Carey KA, Park-Egan B, Han X, Ortiz AC, Schmid BE, Weissman GE, Hochberg CH, Ingraham NE, Parker WF. A common longitudinal intensive care unit data format (CLIF) for critical illness research. *Intensive Care Med*. 2025 Mar 13. doi: 10.1007/s00134-025-07848-7. Epub ahead of print. Erratum in: *Intensive Care Med*. 2025 Mar 31. doi: 10.1007/s00134-025-07869-2. PMID: 40080116.
- **39** Thissen A, Salgado-Baez E, Fürstenau D, Delucchi Danhier R, Meske C, Kuss P, Angermair S, Spies C, Balzer F. Barriers and facilitators of the use of computerized critical care information systems in the intensive care unit: A qualitative interview study. *J Med Internet Res*. 2025 Feb 10. doi: 10.2196/49254. Epub ahead of print. PMID: 40192735.
- **40** Borges do Nascimento IJ, Abdulazeem H, Vasanthan LT, Martinez EZ, Zucoloto ML, Østengaard L, Azzopardi-Muscat N, Zapata T, Novillo-Ortiz D. Barriers and facilitators to utilizing digital health technologies by healthcare professionals. *NPJ Digit Med*. 2023 Sep 18;6(1):161. doi: 10.1038/s41746-023-00899-4. PMID: 37723240; PMCID: PMC10507089.
- **41** De Georgia MA, Kaffashi F, Jacono FJ, Loparo KA. Information technology in critical care: review of monitoring and data acquisition systems for patient care and research. *ScientificWorldJournal*. 2015;2015:727694. doi: 10.1155/2015/727694. Epub 2015 Feb 4. PMID: 25734185; PMCID: PMC4334936.
- **42** Gordo Vidal F, Gordo Herrera N. Advanced data analysis and intensive care medicine. *Med Intensiva (Engl Ed)*. 2024 Jan;48(1):1-2. doi: 10.1016/j.medine.2023.07.012. Epub 2023 Jul 27. PMID: 37516616.
- **43** van Genderen ME, Cecconi M, Jung C. Federated data access and federated learning: improved data sharing, AI model development, and learning in intensive care. *Intensive Care Med*. 2024 Jun;50(6):974-977. doi: 10.1007/s00134-024-07408-5. Epub 2024 Apr 18. PMID: 38635044; PMCID: PMC11164808.
- **44** Tan SC, Evans T, Hensman T, Durie M, Secombe P, Pilcher D. Clinical Informatics needs to be a competency for Intensive care training. *Crit Care Resusc*. 2023 May 20;25(1):6-8. doi: 10.1016/j.ccrj.2023.04.003. PMID: 37876988; PMCID: PMC10581266.



2.3 La Digitalización en procesos clínicos. Servicios de Cardiología

Los Servicios de Cardiología actuales se caracterizan por un alto grado de subespecialización, que permite atender la gran demanda diagnóstica y terapéutica en escenarios de enfermedad muy diversos. Las principales áreas de actividad son: 1) la cardiología clínica, que está en la primera línea de atención al paciente ambulatorio y hospitalizado, y que está su vez muy subespecializada según grupos específicos de patologías cardíacas; 2) cardiología invasiva, que incluye secciones de hemodinámica e intervencionismo cardíaco y electrofisiología, que se encargan del diagnóstico y tratamiento percutáneo de la enfermedad coronaria, estructural y arritmias; y 3) diagnóstico por la imagen, que incluye la realización y análisis de las diferentes modalidades de imagen cardíaca, entre las que destaca la ecocardiografía. Fruto de esta subespecialización, se ha diversificado la cantidad de información generada en los procesos diagnósticos derivada de las diferentes tecnologías empleadas en cada área, y la necesidad de sistemas de información que gestionen este gran volumen de datos.

La actividad de un Servicio de Cardiología en el SNS depende de su cartera de servicios, en función del tipo de hospital al que pertenece, donde la principal variable es la disponibilidad o no de sistemas de intervencionismo por imagen (Hemodinámica y Electrofisiología) y, si procede, de cirugía cardíaca.

Así, para definir un modelo de Servicio de Cardiología genérico, sobre el que desplegar el impacto de las Soluciones de Información Clínica asociadas al proceso asistencial, nos vamos a basar en los datos publicados en el registro RECALCAR 2024 (1), Recursos y Calidad en Cardiología, que publica la Sociedad Española de Cardiología, donde se identifican 153 hospitales generales del SNS con más de 200 camas sobre el que se definen cuatro grupos de tipología de Servicio.

Utilizaremos como base genérica de Unidad de Cardiología (UC) el definido como Grupo 3: un hospital nivel 3 con camas de hospitalización asignadas a cardiología, con laboratorio de hemodinámica y sin servicio de cirugía cardiovascular, que realizan más de 400 intervencionismos coronarios percutáneos al año. De este modo, lo usamos de ejemplo como el caso más frecuente entre los hospitales de alta complejidad.

Los recursos y nivel de actividad media, según los datos del registro RECALCAR son los siguientes:

RECURSOS

Estructura	nº
Nº de camas de Hospitalización	40
Nº de Salas de Hemodinámica	2
Nº de Salas de Electrofisiología	1
Equipos de Ecocardiografía	6
Equipos de Ergometría	2
Equipos de Holter (Nº de grabad.)	10
Equipos de EOG	8
Unidades de Monit. Telemétrica	10
Salas de Consulta	10
Nº de Cardiólogos	30
Actividad anual	nº
Nº de Altas Camas hospitalarias	2000
Estancia media	5
Total estancias (días)	10000
Nº de Primeras consultas	5000
Factor consultas sucesivas	2,5
Total consultas por año	12500
Rev. Marcapasos (presencial y remo)	5000

Este centro podría ajustarse a los siguientes parámetros relacionados con el número de pruebas diagnósticas realizadas anualmente (valores aproximados utilizando la mediana de los parámetros definidos):

Actividad de Procesos Diagnósticos		Tipología
Gammagrafías	300	Imágen
Cardio - Resonancias	400	Imágen
Cardio - TAC	400	Imágen
Nº procesos Hemodinámica	3600	Imágen + Señales
Nº procesos de Electrofisiología	2600	Imágen + Señales
Nº de Ecocardiogramas	10000	Imágen
Nº de procesos de Ergometría	1000	Señales
Nº de estudios Holter	1600	Señales
Nº de Electrocardiogramas	40000	Señales
Nº de días de Monitorización Telemétrica	2000	Señales

De estos datos, se puede inferir el elevado volumen de información generada a nivel de los diferentes procesos.

2.3.1 Descripción de los Sistemas de Información disponibles y su función

a subespecialización en los Servicios de Cardiología genera diariamente un conjunto muy voluminoso y heterogéneo de información en las diferentes áreas de actividad. En las áreas clínicas, la mayor cantidad de datos se concentra en la historia clínica electrónica, mientras que, en otras áreas como la hemodinámica o la imagen, la mayor cantidad de datos se relacionan con imágenes como la ecocardiografía, la cardio-resonancia, la tomografía computarizada y las angiografías.

Las señales derivadas de ECG y holter, siendo menos complejas, también son importantes en términos cuantitativos por el elevado número de pacientes a los que se realizan, excediendo a menudo el área de Cardiología y realizándose en otros servicios hospitalarios y en el ámbito de la atención primaria.

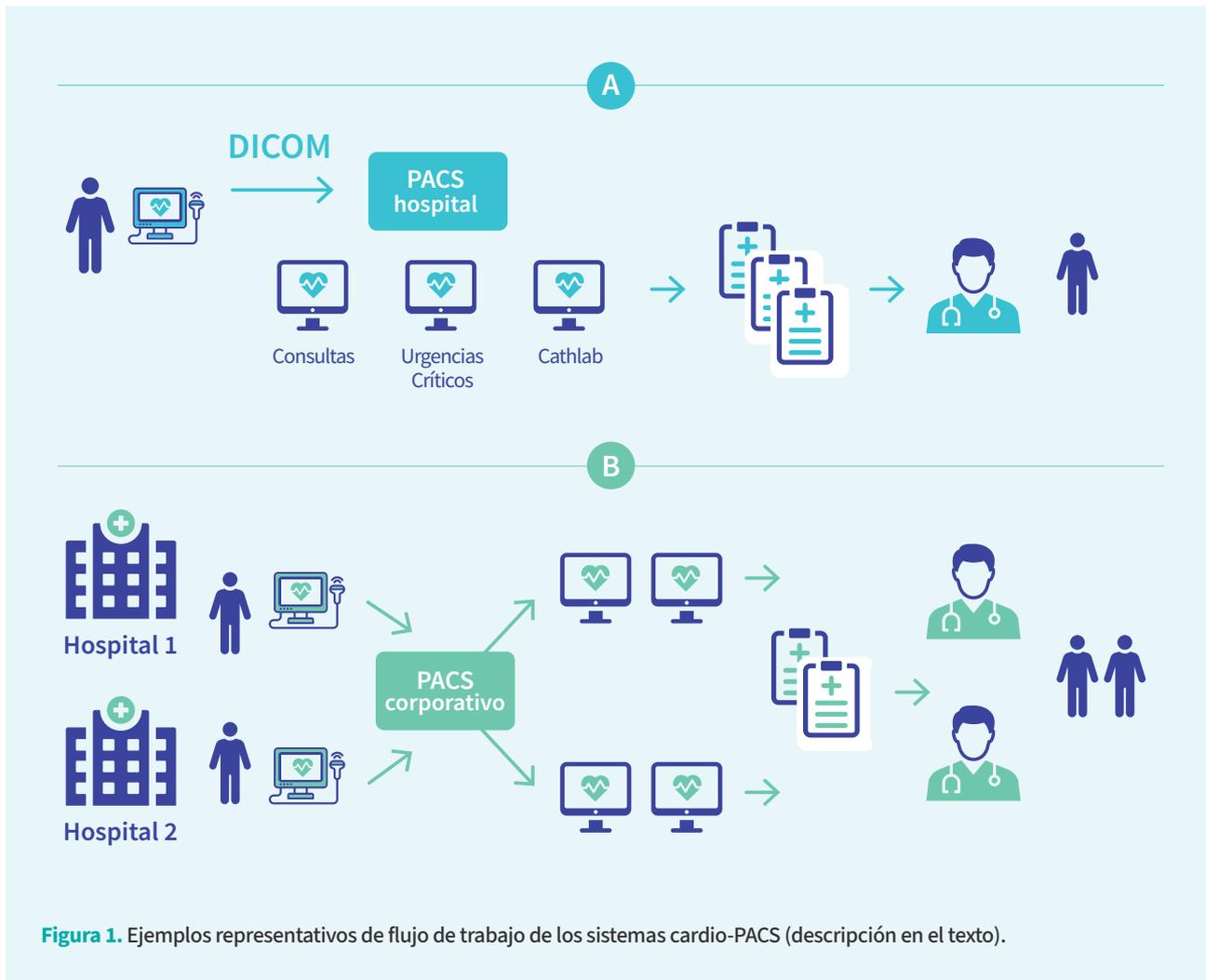
Dentro de los sistemas de Información específicos para Cardiología, los tres casos más relevantes son los Sistemas de Gestión de ECG y señales electrocardiográficas, los Sistemas de Gestión de Imagen Cardíaca y los Sistemas de Telemedicina para la gestión remota de procesos cardiovasculares.

a) Sistemas de Gestión de ECG: Permiten generar, gestionar, priorizar y compartir los electrocardiogramas adquiridos desde diferentes ubicaciones y almacenar estos registros de ECG en diferentes formatos, incluida la señal binaria. Además, pueden generar datos diagnósticos de forma automatizada gracias a diferentes algoritmos. El ECG es una técnica diagnóstica casi “universal”, es decir, dispone prácticamente a cualquier nivel de nuestro sistema sanitario. Tiene una elevada rentabilidad diagnóstica en patología aguda como el infarto agudo de miocardio y las arritmias cardíacas, así como en procesos crónicos para sospechas o descartar la presencia de cardiopatías crónicas asociadas a hipertensión o hereditarias. En este sentido, la digitalización de estos sistemas es clave para llevar a cabo diagnósticos más precoces y tomas de decisión más rápidas; así, es un elemento fundamental para decidir si un paciente requiere ser derivado a un centro hospitalario, tanto por la vía de urgencias como por consultas ambulatorias de especialistas. Por otra parte, la digitalización permite

un aspecto a menudo necesario: la comparación de registros del mismo paciente, que puede facilitar la toma de decisiones en determinados momentos. Ejemplo de ello es el paciente crónico, en el que a menudo existen ECG disponibles, y cuya comparación con el ECG actual identifica la presencia o ausencia de cambios que pueden ser importantes de cara a derivar un paciente a urgencias, o solicitar otros estudios diagnósticos de carácter más invasivo.

La implementación de este tipo de sistemas permite generar grandes repositorios de información que posteriormente pueden ser explotados para generación y validación de algoritmos diagnósticos basados en IA. Es importante resaltar que el almacenamiento de estos registros debe basarse en datos estructurados que puedan ser utilizados y explotados posteriormente, por lo que se recomienda el uso de estándares como DICOM Waveform o XML, evitando, en lo posible formatos tipo “pdf”.

b) Sistemas de Gestión de Imagen Cardíaca (Cardio-PACS). En el caso de las modalidades de diagnóstico por la imagen como la ecocardiografía, la transición a sistemas basados en Sistemas de Gestión de Imagen (PACS), con estaciones de postproceso específico para imagen cardíaca, ha automatizado los flujos de trabajo de generación de estudios y almacenamiento, que con los sistemas previos (primero en formatos de video “VHS”, y posteriormente almacenamiento de DVD) era una labor manual y que requería un tiempo adicional para gestionar este almacenamiento. Por otra parte, una de las principales ventajas es la rapidez para recuperar estos estudios para su revisión posterior, así como el potencial para compartir estudios entre profesionales y entre diferentes centros. En su conjunto, este flujo de trabajo ha demostrado ser eficiente reduciendo los tiempos de realización de estudios. Por otra parte, el almacenamiento digital en Cardio-PACS permite en muchos ámbitos el acceso remoto a los estudios para facilitar la toma de decisiones clínicas, especialmente cuando deben participar diferentes profesionales, en ocasiones de diferentes centros. Ejemplos representativos del funcionamiento de estos sistemas se muestran en la **Figura 1**. En la parte superior (A) se muestra el flujo de trabajo en un hospital en el que el almacenamiento digital en PACS facilita el acceso a las imágenes y generación de informes en diferentes áreas del hospital (por ejemplo, en consultas externas, área de Urgencias o la-



boratorios de hemodinámica) a través de estaciones de trabajo de postproceso de imagen cardíaca. En la parte inferior (B), se muestra el flujo de trabajo entre 2 hospitales que pueden compartir estudios realizados en cada centro a través de un PACS común, que da acceso a estudios realizados en centros distintos, facilitando la toma de decisiones sin repetir estudios de forma innecesaria, lo que reduce los desplazamientos del paciente entre centros y evita demoras en la toma de decisiones.

La rápida disponibilidad del historial de un paciente permite identificar la presencia de estudios previos, en particular los más recientes. Así, algunas soluciones ofrecen una “línea temporal” que facilita al clínico esta labor. Por una parte, este tipo de gestión de estudios puede evitar la repetición innecesaria de estudios que en ocasiones son solicitados por diferentes médicos desde diferentes departamentos; por otro lado, se facilita la comparación de los datos diagnósticos para

valorar tendencias temporales de cambios que pueden asociarse a progresión de determinadas patologías.

La ecocardiografía es la principal técnica de imagen cardíaca por su gran disponibilidad y rentabilidad diagnóstica en multitud de patologías. La actividad asociada a ecocardiografía es la de mayor volumen en cuanto a número de estudios, como puede confirmarse en los datos de actividad presentados anteriormente. El incremento en cuanto a actividad y la necesidad de almacenar gran cantidad de imágenes y datos ha favorecido la difusión de sistema de información en ecocardiografía basado en Cardio-PACS y capacidad de estructurar los diagnósticos y mediciones. La integración de sistemas de información específicos mejora los flujos de trabajo y el rendimiento de las unidades de imagen cardíaca (2). Datos del Hospital Universitario La Fe de Valencia entre los años 2019-24 indican que la implementación de este tipo de sistemas

Variables por estudio

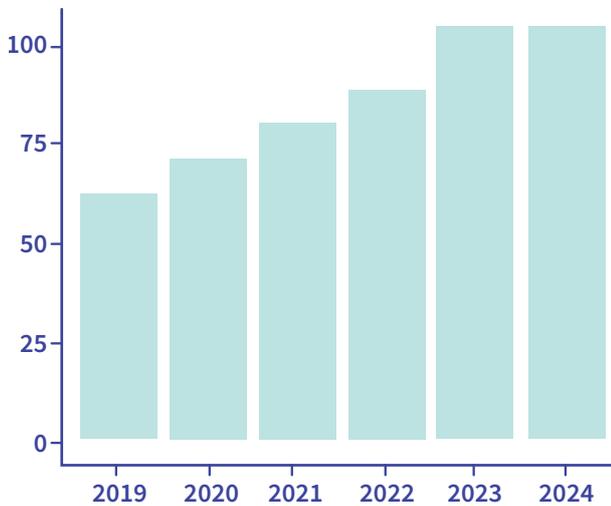


Figura 2. La implementación de sistemas de informes estructurados en cardio-PACS se asocia a un incremento progresivo de la cantidad de información estructurada (Datos del Hospital Universitario La Fe, Valencia).

se asocia a un incremento progresivo de la cantidad de información estructurada que se obtiene de cada paciente, sin que se incremente el tiempo de análisis y de creación de informes (**Figura 2**). Esto indica que, en un periodo de 2-3 años, se produce una adaptación progresiva de los cardiólogos a estos sistemas de información estructurada que facilita un análisis más detallado, lo que probablemente afecta a la calidad y fiabilidad de los datos.

Por otra parte, la implementación de herramientas de post-procesado semi-automatizadas permite llevar a cabo la obtención de mediciones más complejas que anteriormente requerían un tiempo de análisis adicional, y que en definitiva aportan robustez a los diagnósticos derivados de mediciones tradicionales. Un ejemplo representativo es el análisis de la función ventricular izquierda, tradicionalmente evaluada mediante la fracción de eyección derivada del trazado manual de contornos endocárdicos en imágenes bidimensionales, a la que se añaden modalidades de análisis a partir de imágenes tridimensionales, o mediante detección y seguimiento (“tracking”) automático del endocardio en imágenes triplanares.

Los Sistemas de Gestión de Imagen en ecocardiografía son un elemento clave en el marco de control de calidad. Así, es un instrumento que permite implementar y evaluar el nivel de exhaustividad con el que se

aplican protocolos o “checklists” que incluyen conjuntos mínimos de datos. Facilitan la creación de informes consistentes y los análisis de reproducibilidad a nivel de laboratorio, incluyendo reanálisis de estudios previos para evaluar la variabilidad de determinadas medidas clave. Las sociedades científicas proponen esquemas estandarizados para realizar los informes ecocardiográficos incluyendo las nomenclaturas y estructuras de estos; la aplicación de estas recomendaciones se facilita mediante sistemas de información estructurados, mientras que resulta altamente complejo mediante informes tradicionales en formatos de texto libre (3,4).

Perspectivas de futuro en Cardio-PACS. La ecocardiografía es, por el volumen de actividad a nivel de la mayoría de los centros, la modalidad diagnóstica con una mayor capacidad de generación de imágenes y datos por paciente. En un hospital de nivel 3-4, una actividad anual de 10-15 mil estudios (400-600 mil nuevas imágenes) abre grandes perspectivas respecto a su uso para entrenamiento y validación de modelos de Inteligencia Artificial. Por otro lado, el análisis de estas imágenes por expertos, gracias a sistemas de informes estructurados, genera grandes conjuntos de datos explotables tanto desde el punto de vista asistencial (control de calidad, sistemas de ayuda al diagnóstico) como futuros desarrollos en investigación. Desde la perspectiva de los datos, hay que tener en cuenta que, en términos de almacenamiento, la generación de datos estructurados aporta un valor adicional: estimamos que un hospital de nivel 3 o 4 almacena cerca de 15 terabytes en imágenes asociados a una actividad de 11 mil ecocardiogramas; sin embargo, los datos diagnósticos asociados a estos estudios (promedio de 24 códigos diagnósticos y 82 mediciones) ocupa menos de 100 megabytes.

c) Sistemas de telemonitorización y eConsulta (gestión de consultas de crónicos sin presencialidad, compartiendo los datos diagnósticos entre Atención Primaria y Cardiología). Se establecen aquí escenarios clínicos más centrados en el paciente crónico o ambulatorio donde los desarrollos tecnológicos abren nuevas estrategias de diagnóstico y tratamiento. Ejemplo de ello son: 1) la telemonitorización y tele-intervención en el control de los factores de riesgo cardiovascular y, especialmente, en el paciente con insuficiencia cardiaca o la tele-rehabilitación tras un infarto agudo de miocardio; y 2) los sistemas de monitorización remota de los dispositivos de estimulación cardiaca.

Algunos de los sistemas digitales más relevantes en la gestión del paciente crónico se describen a continuación.

1.- Telemonitorización. Ya en 2016 la “*American Heart Association*” establece una serie de recomendaciones sobre la implementación de la “tele-salud” en la atención al paciente cardiovascular (5), posteriormente en 2022 se publica un documento de posicionamiento de dicha sociedad en este tema (6). Así, la telemedicina cardiovascular en la era post-COVID ha demostrado que una proporción importante de consultas se puede llevar a cabo sin presencialidad. Existen diferentes modalidades para llevar a cabo esta estrategia: **1)** visita virtual o sincronizada; **2)** eConsultas: intercambio digital de información médica: ejemplo: cardiología-atención primaria; **3)** híbridas: monitorización remota.

La monitorización remota se ha beneficiado del desarrollo de nuevas tecnologías como los llamados “*wearables*” y dispositivos tipo “*internet of things*” (IoT), gracias a los cuales, información obtenida mediante diferentes sensores que están a disposición del paciente se pone a disposición de una plataforma que agrega los datos y permite la medida de desviaciones o alertas. Ejemplo de ellos son las básculas inteligentes y las pulseras de actividad. Un caso relevante es el uso de sistemas de autodetección de fibrilación auricular mediante pulseras y smartphones (7), si bien se ha demostrado el potencial beneficio de estos sistemas en el manejo remoto de la hipertensión arterial (8). Asimismo, el

desarrollo de nuevas tecnologías como los “pastilleros inteligentes” o “*digital pills*”, ayudan al paciente a cumplir los tratamientos farmacológicos mediante la monitorización remota.

El Caso de uso en telemonitorización más extendido en el paciente cardiovascular es la **insuficiencia cardíaca**.

La insuficiencia cardíaca (IC) es la principal patología crónica asociada a múltiples cardiopatías, y que, por la complejidad de su diagnóstico y tratamiento, supone un elevado coste para los sistemas sanitarios. Además, es esperable que, debido a su asociación con el envejecimiento de la población, su prevalencia siga aumentando en los próximos años. Gran parte del gasto sanitario asociado a la IC se debe a ingresos hospitalarios, que puedan afectar de forma recurrente a estos pacientes. Por ello, existe un gran interés en desarrollar nuevas estrategias para prevenir las hospitalizaciones, especialmente en los primeros meses tras un primer ingreso. Para llevar a cabo estas intervenciones, con un enfoque multidisciplinar y centradas en esta etapa vulnerable de los pacientes, se ha propuesto la telemedicina, incluyendo acciones como el control diario de datos biométricos y síntomas, así como tele-intervenciones a través de entrevistas estructuradas con el equipo médico.

Los sistemas de monitorización más sencillos reciben información del paciente al respecto de datos biométricos como peso, frecuencia cardíaca y presión arterial, que permite al equipo asistencial, controlado por



“Los sistemas de autodetección de fibrilación auricular a través de pulseras y smartphones tienen el potencial de ser beneficiosos en el manejo remoto de la hipertensión arterial.”

enfermería especializada, ajustar tratamientos y otras medidas, y llevar a cabo una formación al paciente respecto a los autocuidados, toma de medicación, y autodetección precoz de signos de alerta. Por otra parte, se facilita el contacto con la unidad correspondiente en caso de necesidad, evitando visitas a urgencias innecesarias.

Además de la transmisión de datos “externos” como la presión arterial y el peso diario, se han evaluado también el valor de sensores internos, bien como complemento de dispositivos implantables como marcapasos o DAI, o bien dispositivos específicos que se implantan en la arteria pulmonar para medición de impedancias o presiones pulmonares. El objetivo de estas intervenciones es usar los datos registrados de forma continua para individualizar el tratamiento farmacológico y en particular, el manejo del estado de volemia del paciente.

En España, el Hospital de Bellvitge en Barcelona ha sido pionero en la puesta en marcha de un programa de telemedicina en la IC. Fruto de esta experiencia se ha llevado un ensayo clínico unicéntrico “*proof-of-concept*” iCOR (*The insuficiència Cardíaca Optimització Remota [iCOR] Heart Failure Remote Optimization*), que demostró que una intervención basada en tele monitorización y tele intervención reducía los reingresos hospitalarios comparado con una estrategia basada en visitas presenciales, y posteriormente refutado en el ensayo multicéntrico HERMeS: “*Heart failure Events reduction with Remote Monitoring and eHealth Support*” (HERMeS, *ClinicalTrials.gov* Identifier: [NCT03663907](https://clinicaltrials.gov/ct2/show/study/NCT03663907), más información en <https://bellvitgehospital.cat/es/proyectos-de-innovacion/eoss>).

2.- La e-Consulta, es un proceso asistencial donde los facultativos de atención primaria y de cardiología comparten la información del paciente, mediante la HCE y procesos diagnósticos como el ECG, para proceder a la toma de decisiones diagnósticas sin la presencia del paciente. Ese proceso, aplicable a los pacientes con menor complejidad clínica, reduce el tiempo de es-

pera de los pacientes con mayor complejidad, mejora el acceso a la atención sanitaria, reduce la necesidad de visitas a urgencias, las complicaciones que requieren ingreso hospitalario y la mortalidad (9).

Los datos del registro RECALCAR (1) indican que se ha producido un notable aumento de esta modalidad (9,2 por mil habitantes y año), si bien se destacan las limitaciones relacionadas con la “*desigualdad en su implantación, las deficiencias en la recogida de esta información, su probable falta de estandarización y ocasionalmente la no asignación de tiempos por parte de las gerencias para esta actividad*”. Se resalta su utilidad como herramienta de cribado por e-Consulta desde atención primaria y otros servicios hospitalarios empleando criterios de derivación consensuados. El registro RECALCAR muestra que las consultas no presenciales se han duplicado en 2023 con respecto a los dos años anteriores, cuya utilidad más importante es probablemente el cribado de las solicitudes de consulta realizadas desde atención primaria. La vía preferente para la e-consulta es la historia clínica electrónica, y el acceso a las pruebas diagnósticas específicas (ECG, Analítica, Ecocardiografía, etc.) no disponiendo todavía de información confiable sobre el porcentaje de las e-consultas que requieren posteriormente consulta presencial (situándose en alrededor de un 60% en los trabajos publicados).

3.- Sistemas de monitorización remota de los dispositivos de estimulación cardíaca y Holter.

En pacientes portadores de sistemas de estimulación cardíaca como marcapasos o desfibriladores implantables (DAI), la pandemia COVID-19 ha favorecido la transición de modelos basados en consulta presencial a la telemonitorización (10). Esta tecnología está extendiéndose a nivel nacional y por comunidades autónomas, lo que es indicativo de que se trata de una estrategia eficaz que ahorra un elevado número de visitas presen-





ciales y ampliamente establecida en nuestro país. En un estudio publicado en 2024 sobre los 205.345 implantes de dispositivos de estimulación cardíaca llevados a cabo en España entre 2018 y 2021 para evaluar el impacto de la pandemia (10), se observó un porcentaje de activaciones de monitorización a distancia en todos los tipos de dispositivos (24,5% en 2018 al 49,0% en 2021), incluyendo marcapasos (el 14,4 frente al 37,2%); DAI (el 75,6 frente al 94,2%) y Holter implantables (el 50,2 frente al 68,7%).

En estos sistemas, alertas que se envían automáticamente a través de diferentes tecnologías (Bluetooth, Wi-Fi), permiten detectar problemas con una mayor precocidad y por tanto establecer las medidas pertinentes más rápido, en comparación con las revisiones presenciales tradicionales. Por otra parte, se reduce de forma muy significativa el número de visitas en pacientes que no han tenido incidencias, y que, por tanto, no aportan valor al paciente y consumen recursos del sistema sanitario (11).

Como ejemplo de uso de los diferentes Sistemas de Información en Cardiología podemos mencionar el “proceso TAVI” (Figura 3), donde el esquema muestra

la integración de los distintos sistemas de información que acompañan a este proceso. El proceso “TAVI” hace referencia al diagnóstico, intervención mediante prótesis de implante percutáneo, y seguimiento posterior, que se está convirtiendo en unos de los más relevantes y crecientes en los Servicios de Cardiología. En este caso específico, se muestra el necesario intercambio de datos e imágenes entre centros (habitualmente un centro de referencia donde se lleva a cabo la intervención, y centros “referidores” que realizan el estudio previo y posterior a la intervención). La integración de sistemas de información permite comparar la información de un paciente con perspectiva evolutiva, y a menudo evitar duplicidades en realización de pruebas diagnósticas.

2.3.2 Desarrollo de evidencias y casos donde aportan valor en salud y eficiencia

Las nuevas tecnologías digitales se han evaluado e implementado con éxito en diferentes escenarios entre los que destaca el riesgo vascular y la insuficiencia cardíaca. En el ámbito del riesgo cardiovascular, se ha demos-

trado el beneficio de estrategias que buscan reforzar la cumplimentación terapéutica, y así logran objetivos terapéuticos de control de factores de riesgo más adecuados de acuerdo con las recomendaciones actuales.

Aunque ya se han mencionado referencias y evidencias a lo largo de este documento, complementamos con algunas evidencias adicionales:

En pacientes con insuficiencia cardiaca, un metaanálisis de 92 estudios incluyendo 36549 pacientes, el uso de intervenciones basadas en telemedicina mostró una reducción del riesgo de mortalidad y hospitalización por insuficiencia cardiaca, si bien existe heterogeneidad por las diferentes metodologías empleadas. En este estudio se evaluaron estrategias no invasivas e invasivas (como los DAI que incorporan sensores de impedancia como “Heartlogic” y mediciones de presión en arteria pulmonar como el sistema “CardioMEMS”) (12).

Otro escenario en el que se han evaluado con éxito intervenciones basadas en telemedicina son los programas de rehabilitación cardiaca tras un infarto agudo de miocardio. Una revisión Cochrane en 2023 evaluó 24 ensayos clínicos en los que, mediante diferentes diseños, la tele-rehabilitación fue equivalente a la rehabilitación presencial (13).

2.3.3 Nivel de adopción de estas tecnologías

Existen importantes variaciones interterritoriales en la dotación de recursos, frecuentación, producción y calidad en la atención al paciente cardiológico, así como en la forma de organizar y gestionar la asistencia cardiológica. El estudio RECALCAR (1) lleva varios años ofreciendo los datos comparativos de diferentes CCAA. Aunque la tecnología solo actúa como facilitadora del desarrollo de modelos asistenciales más fluidos, donde el proceso y las personas son la clave para el éxito, el abordaje de algunos modelos asistenciales solo es posible con las herramientas apropiadas.

No existen registros documentales sobre el número de sistemas implantados en España, por lo que hacemos una aproximación, proveniente de diferentes consultas con profesionales de la tecnología sanitaria y documentación pública disponible, que podría cuantificarse como sigue:

I Sistemas de Gestión de ECG:

Existen sistemas corporativos, implantados por las CCAA para el desarrollo de un modelo estandarizado

para el Sistema Regional de Salud, en Baleares, Murcia, Asturias, País Vasco y Castilla La Mancha ya en funcionamiento. En proceso de implantación están Valencia, Canarias, Aragón y Castilla León.

Adicionalmente, hay más de 15 centros sanitarios que disponen de un sistema de Gestión de ECG implantado.

I Sistemas de Gestión de Imagen Cardiaca

Existen sistemas corporativos de Imagen Cardiaca en Baleares, Murcia, Asturias, País Vasco, Navarra, Aragón, La Rioja y Castilla La Mancha ya en funcionamiento. En proceso de implantación están Canarias y Castilla León. Asimismo, Galicia, la Comunidad Valenciana y la Comunidad de Madrid disponen de sistemas en todos los hospitales, pero no están integrados.

Existe un alto nivel de adopción de Sistemas de Gestión de Imagen Cardiaca, específicamente dedicados a la Ecocardiografía, entre los Hospitales Españoles con más de 300 camas. Dentro de su utilización, la implementación de informe estructurado se limita al 62%, en base al estudio/encuesta desplegada por la Asociación de Imagen Cardiaca de la Sociedad Española de Cardiología (14).

I Sistemas de Telemedicina

Telemonitorización de IC: Las iniciativas implantadas corresponden a casos desarrollados en determinados centros sanitarios, que en muchos casos cubren un número de pacientes bajo, lo que hace pensar en proyectos piloto. El caso más desarrollado es el publicado por el Hospital de Bellvitge de Barcelona. Asimismo, existen iniciativas corporativas para la implementación de Plataformas de Telemonitorización de pacientes crónicos, donde Andalucía lideró recientemente la implantación de un sistema mediante un proceso de Compra Pública de Innovación. Asimismo, existen iniciativas de proyectos publicados en Navarra y Canarias cuyas licitaciones están siendo ejecutadas.

Las unidades de Insuficiencia Cardiaca están ampliamente extendidas en los hospitales, sin embargo, pocas disponen de una plataforma que estandarice los procesos de telemedicina específicos para el paciente de IC.

e-Consulta: Los datos del registro RECALCAR (1) indican que se ha producido un notable aumento de esta modalidad (9,2 por mil habitantes y año), si bien se destacan las limitaciones relacionadas con la “desigualdad en su implantación, las deficiencias en la recogida de



esta información, su probable falta de estandarización y ocasionalmente la no asignación de tiempos por parte de las gerencias para esta actividad”.

Monitorización remota de los dispositivos de estimulación cardíaca y Holter: es una tecnología ampliamente extendida promovida por la propia industria de dispositivos que incorpora estas soluciones como complemento de valor añadido a sus servicios.

2.3.4 Barreras para el despliegue de los sistemas de información

Bajo nuestro punto de vista, las principales barreras para la expansión y despliegue de estos sistemas de información son:

- La iniciativa de implantar estos sistemas suele partir de los servicios clínicos, como una extensión de las capacidades de los equipos y sistemas de diagnóstico adquiridos. Esto limita el alcance y la visión agregada de estos sistemas como parte de la infraestructura de los sistemas de información, liderada por el Servicio de Informática, siendo percibidos como soluciones departamentales que no forman parte del “core” de la estructura informática del centro.
- La falta de una visión corporativa, desde los Sistemas Regionales de Salud, limita la expansión de estos sistemas a todos los centros y, por tanto, no permite la interoperabilidad entre ellos, limitando la posibilidad de creación de estructuras colaborativas y “ani-

llos diagnósticos” que estructuren un modelo estandarizado de actuación.

- La implementación de un nuevo sistema de información en un flujo de trabajo implica un cambio significativo en la forma de trabajar del equipo de profesionales, a menudo habituados a unas herramientas de trabajo tradicionales. De este modo, no siempre se percibe la necesidad de implantar estas herramientas por desconocimiento del valor incremental que puede aportar.

2.3.5 Tendencias y perspectivas de futuro.

A medio y largo plazo, se plantean oportunidades para mejorar los sistemas de información en los Servicios de Cardiología:

- *Integración de los Sistemas para aportar una visión agregada del paciente cardíaco.* En la actualidad, los clínicos deben consultar sistemas de información independientes para valorar diferentes tipos de información, ya sean imágenes, ECG u otros como angiografías, Holter o cardio-TAC. La integración de estos sistemas puede no sólo mejorar la toma de decisiones sino optimizar el uso de las pruebas diagnósticas, y evitar errores de interpretación.
- *Codificación y estructura de la información diagnóstica.* La mayor parte de la información en la historia clínica electrónica se almacena en formato no estructurado (texto libre). Los sistemas de información actuales como cardio-PACs incluyen herramientas

de informes estructurados, que permiten asignar códigos y medidas que posteriormente se almacenan en bases de datos. La difusión de este tipo de herramientas no sólo facilitará la consistencia de los informes y la toma de decisiones, sino que abre la puerta a iniciativas colaborativas entre diferentes instituciones con grandes volúmenes de datos.

- *Expansión de algoritmos de IA para la medida y cálculos sobre la imagen que permita valoraciones pronósticas.* En el ámbito de la imagen cardiaca y ECG, se han producido avances significativos en la automatización de medidas mediante algoritmos de IA. Sin embargo, su implementación en la vida real sigue siendo muy escasa. Superadas las barreras que supone la validación y homologación de las diferentes herramientas, su implementación sistemática puede dar lugar a una transformación de los flujos de trabajo, que actualmente consumen la mayor parte del tiempo en el proceso de análisis. Ejemplos de estas perspectivas con el uso de IA para el análisis de ECG y ecocardiografía:
 - › a) algoritmos de IA en la señal del ECG para la detección precoz del infarto agudo de miocardio (15) o para el screening de cardiopatías estructurales (16) y el diagnóstico precoz de alteraciones electrolíticas potencialmente graves como la hiperpotasemia (17).
 - › b) modelos de IA para el análisis automático de estudios ecocardiográficos completos; en este sentido, se han publicado en los últimos años herramientas basadas en “Deep learning” con capacidad de clasificar las vistas ecocardiográficas y ejecutar tareas de diagnóstico complejo como el cálculo de función ventricular o la detección de enfermedades valvulares cardiacas (18-19).
- Explotación clínica de los datos con herramientas de IA y visuales para ayudar a la toma de decisiones. La creciente disponibilidad de sistemas de informe estructurados asociados a cardio-PACS está generando grandes volúmenes de datos. Sobre la base de estos conjuntos de datos, se han desarrollado algoritmos usando “Machine learning” que son capaces de predecir el riesgo de los pacientes de una forma más individualizada comparado con el análisis tradicional (20-21), y para planificar el seguimiento de los pacientes en base a su perfil de riesgo. La implementación de estas herramientas permitirá una mejor utilización de los recursos, tanto en la indicación de

pruebas diagnósticas, como en la selección de pacientes para intervenciones.

- Los avances en Inteligencia Artificial están destinados a transformar los sistemas de información digitales en el ámbito médico. Un ejemplo cada vez más presente en nuestro entorno son los “wearables” como tecnología capaz de recoger datos del paciente de diferente naturaleza y que se integrarán en el futuro en la valoración clínica, más allá de las valoraciones puntuales que se llevan a cabo en las consultas tradicionales. Otro gran campo es el procesamiento de lenguaje natural o “LLM” (de las siglas en inglés “large language models”) **son modelos de aprendizaje automático** que se están desarrollando y validando en diferentes ámbitos de atención al paciente cardiovascular, como la educación de pacientes o la ayuda a la toma de decisiones. Las perspectivas sobre la futura aplicación de LLM’s en los servicios de Cardiología incluyen el procesamiento, interpretación y generación de notas clínicas e informes de técnicas diagnósticas, y la implementación de “ChatBots cardiológicos” para la realización automática de anamnesis, y el apoyo a las decisiones clínicas apoyadas en la literatura más reciente (22).

2.3.6 Conclusiones

Los Sistemas de Información Departamentales son herramientas digitales con una creciente presencia y utilización en las diferentes áreas de actividad en los Servicios de Cardiología. Permiten establecer flujos de trabajo más eficientes y proporcionan herramientas para almacenamiento y estructuración de datos. Este tipo de sistemas son específicos y adaptados a los procesos asistenciales en Cardiología e incorporan herramientas que automatizan procedimientos diagnósticos y facilitan una toma de decisiones más consistentes entre los grupos de profesionales que integran estos servicios.

Se plantean las oportunidades y barreras actuales relacionadas con la expansión de estos sistemas para que estén integrados a nivel CCAA o Nacional, que permita conseguir un volumen de datos apropiados para uso secundario y desarrollo de aplicaciones IA.

Entre las oportunidades, destacamos la posibilidad de desplegar procesos asistenciales centrados en el paciente mediante la reorganización de los procesos apoyados por los sistemas de información.



2.3.7 Referencias.

- **1.** Informe RECALCAR, Sociedad Española de Cardiología. Accesible en: https://secardiologia.es/images/institucional/sec-calidad/sec-recalcar/Resultados_RECALCAR_2024_1.pdf
- **2.** Solis JS, Fahimeh Falahi FF, Garcia Casado SG, Rodriguez Martinez MR, Salguero Bodes SB. Optimizing echocardiography workflow to increase access to high quality care for patients. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2023;24(Supplement_1). doi:10.1093/ehjci/jead119.094.
- **3.** Galderisi M, Cosyns B, Edvardsen T, et al. Standardization of adult transthoracic echocardiography reporting in agreement with recent chamber quantification, diastolic function, and heart valve disease recommendations: an expert consensus document of the European Association of Cardiovascular Imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging*. 2017;18(12):1301-1310. doi:10.1093/ehjci/jex244.
- **4.** Masani N. The Echocardiography Quality Framework: a comprehensive, patient-centered approach to quality assurance and continuous service improvement. *Echo Res Pract*. 2018;5(4):G35-41. doi:10.1530/ERP-18-0052.
- **5.** Schwamm LH, Chumbler N, Brown E, et al. Recommendations for the Implementation of Telehealth in Cardiovascular and Stroke Care: A Policy Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 2017;135(7). doi:10.1161/CIR.0000000000000475.
- **6.** Takahashi EA, Schwamm LH, Adeoye OM, et al. An Overview of Telehealth in the Management of Cardiovascular Disease: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 2022;146(25). doi:10.1161/CIR.0000000000001107.
- **7.** Perez M V, Mahaffey KW, Hedlin H, et al. Large-Scale Assessment of a Smartwatch to Identify Atrial Fibrillation. *N Engl J Med*. 2019;381(20):1909-1917. doi:10.1056/NEJMoa1901183.
- **8.** Luo H, Yang D, Barszczyk A, et al. Smartphone-Based Blood Pressure Measurement Using Transdermal Optical Imaging Technology. *Circ Cardiovasc Imaging*. 2019;12(8):e008857. doi:10.1161/CIRCIMAGING.119.008857.
- **9.** Gonzalez-Juanatey JR, et al. E-consulta avanzada en Cardiología. Accesible en https://www.fundacionsigno.com/archivos/22_barea_2024/modalidad_1_1.pdf.
- **10.** García-Fernández FJ, Calvo Simal S, Cano Pérez Ó, et al. Impacto de la pandemia por COVID-19 en el implante de dispositivos cardiacos implantables y las activaciones de la monitorización a distancia. *Rev Esp Cardiol*. 2024;77(3):243-253. doi:10.1016/j.recesp.2023.07.006.
- **11.** Varma N, Braunschweig F, Burri H, et al. Remote monitoring of cardiac implantable electronic devices and disease management. *Europace*. 2023;25(9). doi:10.1093/europace/euad233
- **12.** Scholte NTB, Gürgöze MT, Aydin D, et al. Telemonitoring for heart failure: a meta-analysis. *Eur Heart J*. 2023;44(31):2911-2926. doi:10.1093/eurheartj/ehad280.
- **13.** McDonagh ST, Dalal H, Moore S, et al. Home-based versus centre-based cardiac rehabilitation. *Cochrane Database of Systematic Reviews*. 2023;2023(10). doi:10.1002/14651858.CD007130.pub5.
- **14.** Agüero Ramón-Llin J, Martínez-Monzónis A, Fernández-Golfín C, Alamar Cervera M, Barreiro-Pérez M. IV informe de actividad y recursos de la Asociación de Imagen Cardiaca de la Sociedad Española de Cardiología (2022). REC: Cardio-Clinics. 2025;60(1):43-52. doi:10.1016/j.rccl.2024.10.010.
- **15.** Lee MS, Shin TG, Lee Y, et al. Artificial intelligence applied to electrocardiogram to rule out acute myocardial infarction: the ROMIAE multicentre study. *Eur Heart J*. Published online February 24, 2025. doi:10.1093/eurheartj/ehaf004.
- **16.** Cohen-Shelly M, Attia ZI, Friedman PA, et al. Electrocardiogram screening for aortic valve stenosis using artificial intelligence. *Eur Heart J*. 2021;42(30):2885-2896. doi:10.1093/eurheartj/ehab153.
- **17.** Harmon DM, Heinrich CK, Dillon JJ, et al. Mortality Risk Stratification Utilizing Artificial Intelligence Electrocardiogram for Hyperkalemia in Cardiac Intensive Care Unit Patients. *JACC: Advances*. 2024;3(9):101169. doi:10.1016/j.jacadv.2024.101169.
- **18.** Long A, Haggerty CM, Finer J, et al. Deep Learning for Echo Analysis, Tracking, and Evaluation of Mitral Regurgitation (DELINEATE-MR). *Circulation*. 2024;150(12):911-922. doi:10.1161/CIRCULATIONAHA.124.068996.
- **19.** EchoPrime: A Multi-Video View-Informed Vision-Language Model for Comprehensive Echocardiography Interpretation. <https://arxiv.org/abs/2410.09704>.
- **20.** Kobayashi M, Huttin O, Magnusson M, et al. Machine Learning-Derived Echocardiographic Phenotypes Predict Heart Failure Incidence in Asymptomatic Individuals. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2022;15(2):193-208. doi:10.1016/j.jcmg.2021.07.004.
- **21.** Sánchez-Puente A, Dorado-Díaz PI, Sampedro-Gómez J, et al. Machine Learning to Optimize the Echocardiographic Follow-Up of Aortic Stenosis. *JACC Cardiovasc Imaging*. 2023;16(6):733-744. doi:10.1016/j.jcmg.2022.12.008.
- **22.** Boonstra MJ, Weissenbacher D, Moore JH, Gonzalez-Hernandez G, Asselbergs FW. Artificial intelligence: revolutionizing cardiology with large language models. *Eur Heart J*. 2024;45(5):332-345. doi:10.1093/eurheartj/ehad838.



INFORME I

LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

III. Inteligencia Artificial y Tecnología Sanitaria. Presente y futuro.

1. Introducción.

2. Inteligencia Artificial en las imágenes médicas.

- 2.1 Aplicaciones actuales de la IA en imagen médica.
- 2.2 Aplicaciones de la IA generativa en la imagen médica.
- 2.3 Desafíos y oportunidades para la IA en imagen médica.
- 2.4 Referencias.

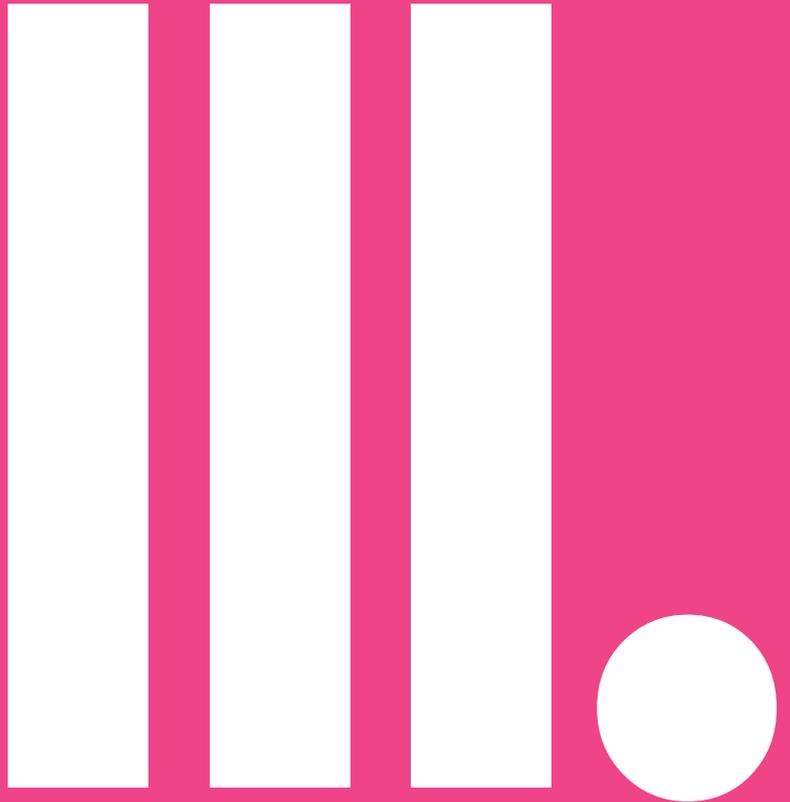
3. Inteligencia Artificial en la robótica médica.

- 3.1 Aplicaciones de IA en cirugía asistida por robots.
- 3.2 Aplicaciones de la IA en robots de neurorrehabilitación.
- 3.3 Desafíos y oportunidades para la IA en la robótica médica.
- 3.4 Referencias.

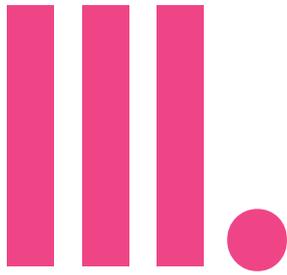
4. Inteligencia Artificial en la salud móvil y medicina personalizada.

- 4.1 Aplicaciones de la IA en salud móvil para el seguimiento remoto de pacientes con enfermedades crónicas.
- 4.2 Aplicaciones de la IA en salud móvil para autocuidado, promoción de la salud y envejecimiento saludable.
- 4.3 Aplicaciones de la IA en medicina personalizada y fenotipo digital.
- 4.4 Chatbots y asistentes virtuales en salud.
- 4.5 Protección de datos y ética en salud móvil y medicina personalizada.
- 4.6 Desafíos y oportunidades para la IA en salud móvil y medicina personalizada.
- 4.7 Referencias.

5. Conclusiones.



Inteligencia Artificial
y Tecnología
Sanitaria.
Presente y futuro.

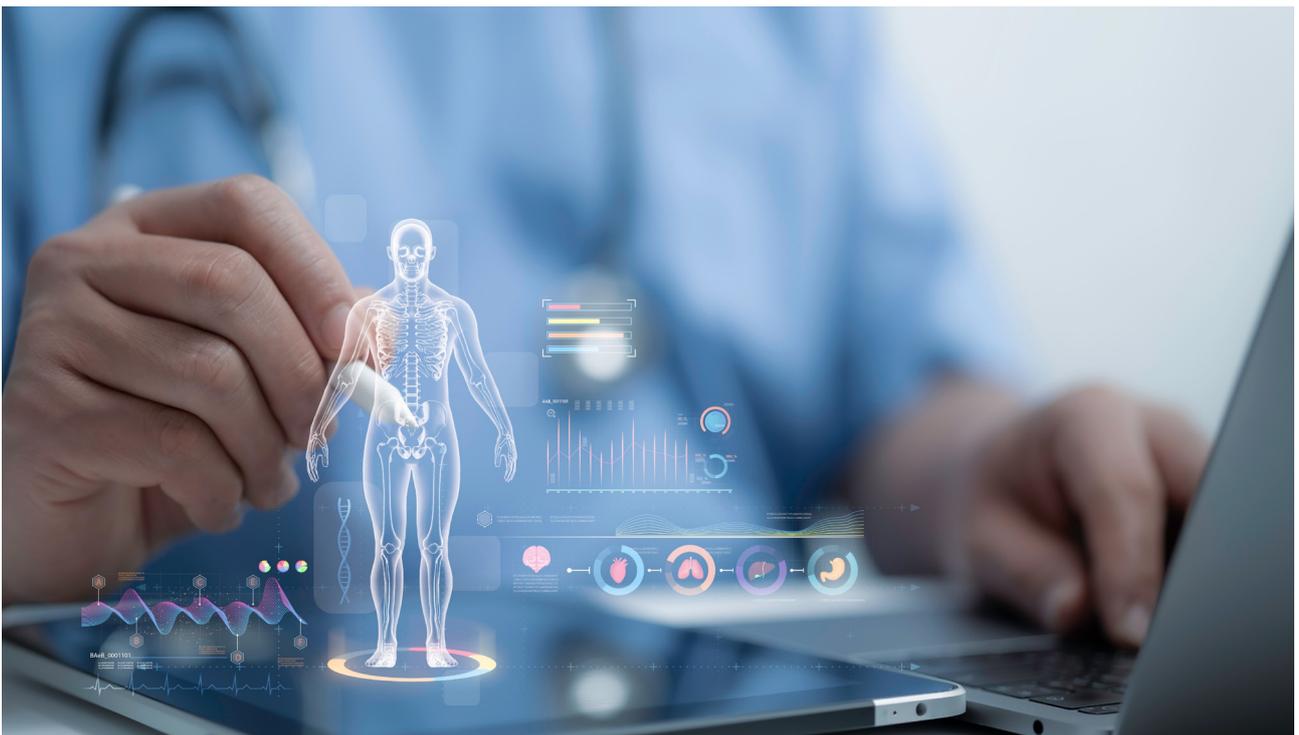


Inteligencia Artificial y Tecnología Sanitaria. Presente y futuro.

1. INTRODUCCIÓN

La inteligencia artificial (IA) está afectando y revolucionando todos los aspectos de la vida moderna. La IA no es una tecnología nueva, nace a mediados del siglo pasado como disciplina científica que se ocupa de crear programas informáticos que ejecutan operaciones comparables a las que realiza la mente humana, como el aprendizaje o el razonamiento lógico. En cualquier área profesional o personal, la IA está alterando nuestra capacidad de comprender y responder a problemas complejos. Una situación potenciada por la aparición, en los últimos años, de la IA generativa que es capaz de aprender los patrones y la estructura de un conjunto de datos de entrenamiento para generar texto o imágenes en respuesta a comandos.

Una de las áreas en la que más impacto y expectativas está generando la IA es en medicina. La IA está proporcionando herramientas muy potentes para mejorar el cuidado de la salud y los resultados clínicos de los pacientes, optimizando la práctica clínica. Además, está siendo fundamental en el proceso de transformación digital de los sistemas sanitarios, que debe verse como una nueva forma de ofrecer servicios sanitarios y optimizar procesos sanitarios, y no tanto como una digitalización de datos clínicos.



Esta transformación digital de la sanidad se fundamenta en los imparables avances en tecnologías sanitarias, permeadas por las tecnologías disruptivas como las comunicaciones móviles, el internet de las cosas o la inteligencia artificial. En el caso de las tecnologías sanitarias, es la ingeniería biomédica (IB) la disciplina científica y profesional que se dedica a aplicar los principios de la ingeniería para mejorar el diagnóstico, el tratamiento, la monitorización y la prevención de enfermedades. La IA está cada vez más integrada en todas las áreas de la IB como es el caso de la bioinstrumentación y los dispositivos médicos, las señales biomédicas, las imágenes médicas, la cirugía robótica, la biomecánica, la ingeniería de tejidos, los biomateriales, o la telemedicina y la salud móvil.

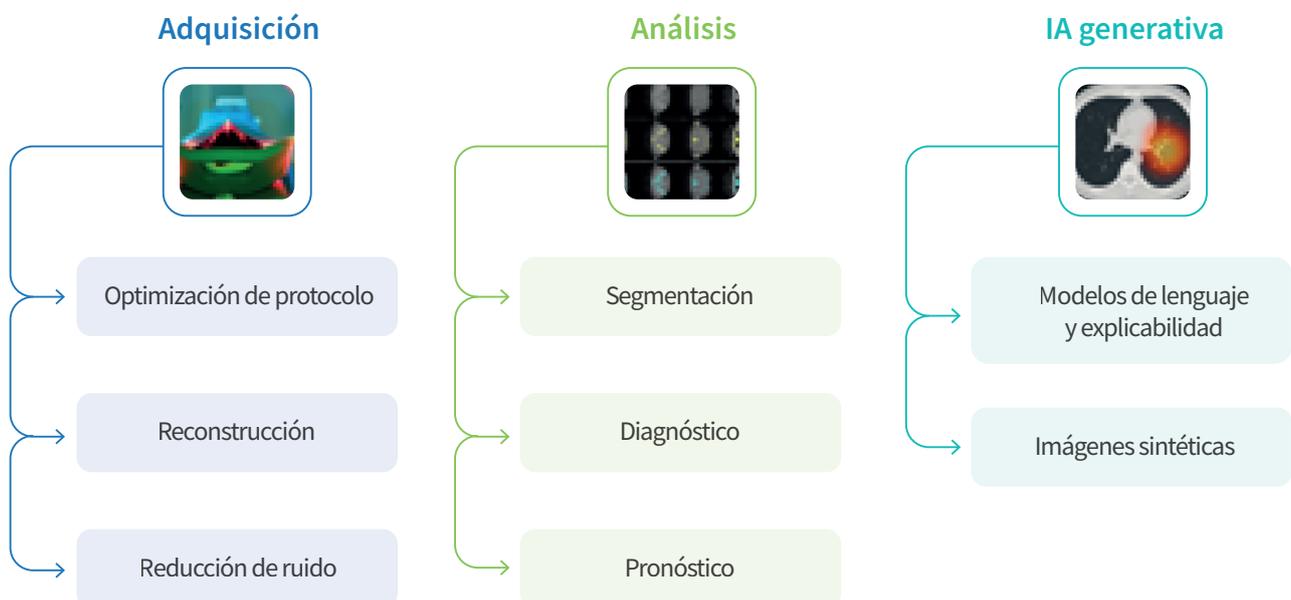
La IA en estas tecnologías biomédicas contribuye sustancialmente a los principales actores de la sanidad: 1) Los profesionales sanitarios (médicos, enfermeros, radiólogos, cirujanos y administradores hospitalarios) que utilizan la IA para optimizar el diagnóstico, el tratamiento, la monitorización de pacientes y la gestión hospitalaria; 2) Los pacientes que se benefician de los cambios generados por la transformación digital y el uso de la IA, al disponer de mejores y más rápidos diagnósticos, tratamientos más efectivos y un sistemas de salud más

accesible y ubicuo; y 3) Los ingenieros biomédicos que emplean la IA para diseñar soluciones innovadoras de atención médica, mejorar los dispositivos médicos y optimizar la atención al paciente, consiguiendo de esta forma tecnologías sanitarias más robustas, precisas y más fáciles de usar por pacientes y profesionales.

En este capítulo se han seleccionado tres de las tecnologías sanitarias en las que la IA está siendo más profusamente utilizada y en las que tendrá un mayor impacto futuro. Estas tecnologías son las imágenes médicas, la robótica en medicina y la salud móvil para medicina personalizada.

La IA en las imágenes médicas está mejorando los procesos de adquisición y reconstrucción de todas las modalidades de imagen (radiografías, tomografía computarizada, medicina nuclear, ecografías y resonancias magnética); facilitando la detección, clasificación y diagnóstico automatizado en todas las áreas clínicas; consiguiendo extraer biomarcadores basados en la radiómica; y empleando algoritmos entrenados con grandes conjuntos de datos que identifican patrones y anomalías en la imagen, que pueden ser difíciles de detectar por los radiólogos, y consiguiendo detectar signos tempranos de enfermedades como el cáncer de mama o enfermedades de la retina.

IA en imagen médica



La IA en la robótica es fundamental en la mejora de la precisión y la eficiencia del cuidado de los pacientes en áreas como la cirugía robótica aplicada en procesos quirúrgicos cada vez menos invasivos, más automatizados y personalizados. Una segunda área de aplicación es la neurorrehabilitación, con prótesis y exoesqueletos, así como una planificación de las terapias de rehabilitación a medida.

En el esquema siguiente se visualiza el papel de la IA en robótica médica, a partir de un proceso estructurado en seis fases clave que permiten integrar capacidades avanzadas de automatización, personalización y aprendizaje en distintos contextos clínicos. **Esquema 1.**

El proceso comienza con la captura y análisis de datos, etapa en la que la IA procesa imágenes médicas y datos clínicos en cirugía robótica para planificar intervenciones precisas; y en neurorrehabilitación, se recopilan datos sobre las capacidades motoras y señales cerebrales del paciente. A continuación, en la fase de planificación y diseño de acciones, la IA genera planes quirúrgicos personalizados en cirugía y diseña progra-

mas terapéuticos adaptativos en rehabilitación. En la tercera etapa, correspondiente a la ejecución automatizada, los sistemas robóticos llevan a cabo con precisión los procedimientos planificados: desde manipulaciones quirúrgicas con distintos niveles de autonomía, hasta la asistencia motora robótica personalizada en rehabilitación. Paralelamente, la monitorización en tiempo real permite a la IA supervisar constantemente los parámetros clínicos del paciente durante una operación, seguir la evolución de la terapia, y controlar la calidad y el flujo de la atención a los pacientes. Esta monitorización posibilita una adaptación y optimización continua, donde los sistemas ajustan automáticamente las estrategias quirúrgicas y los programas de rehabilitación maximizando la eficacia y minimizando errores. Finalmente, la fase de realimentación y aprendizaje permite que la IA mejore progresivamente a partir de los datos recolectados: perfeccionando intervenciones quirúrgicas mediante aprendizaje automático y refinando protocolos de terapia personalizados. Esta secuencia de procesos refleja cómo la IA, integrada con la robótica, está revolucionando el cuidado de la salud desde una perspectiva centrada en la eficiencia, la precisión y la adaptabilidad.

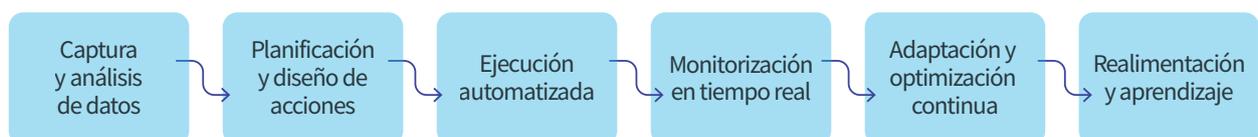
Inteligencia Artificial en la Robótica Médica



Cirugía robótica



Neurorrehabilitación robótica



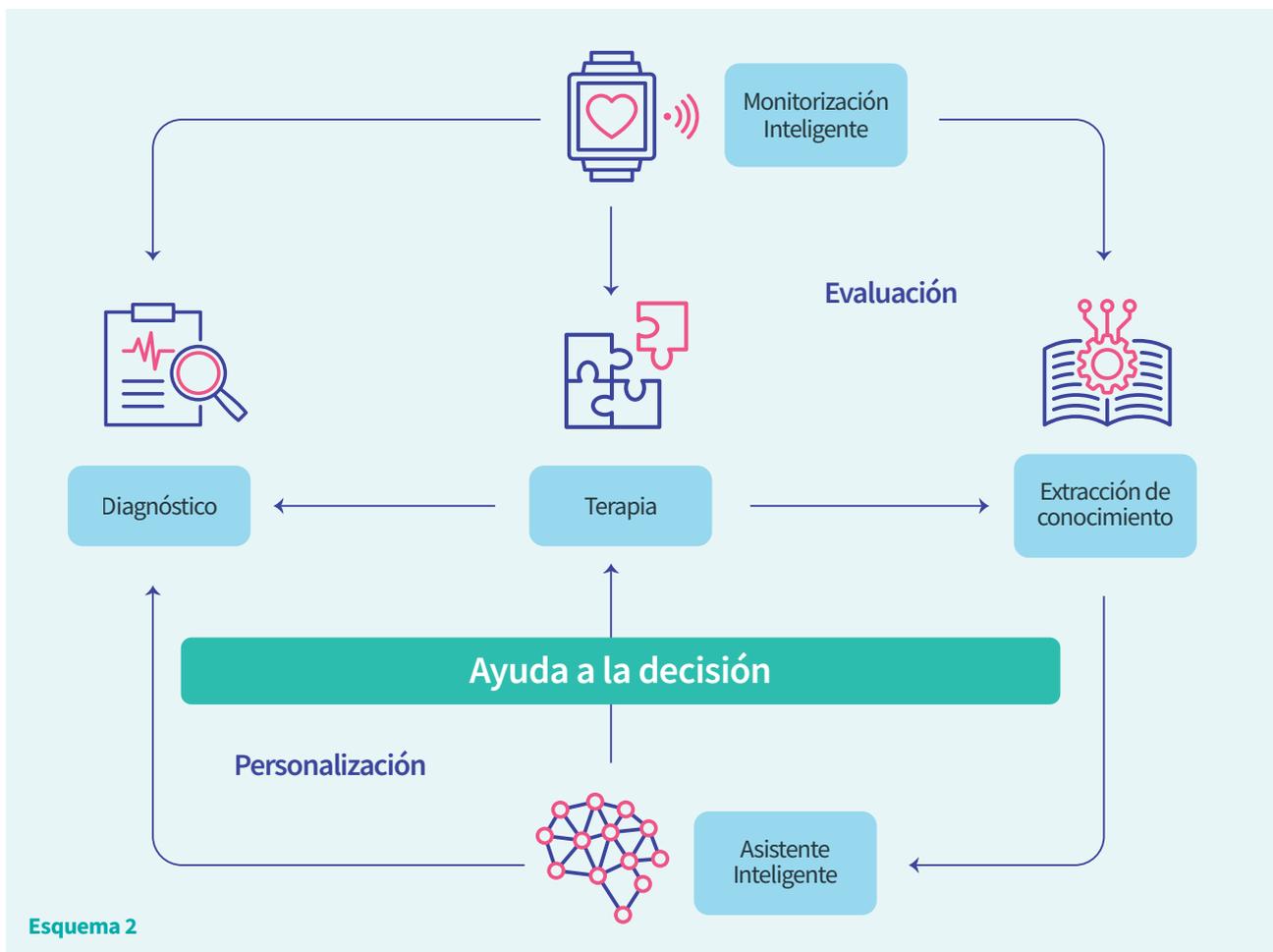
Esquema 1

La IA en la salud móvil es imprescindible en el seguimiento y la monitorización de las variables fisiológicas y del estilo de vida, que son necesarias para el autocuidado de los pacientes crónicos y la promoción de la salud en poblaciones sanas. Esta monitorización de datos a través de dispositivos como los biosensores, los relojes inteligentes, los teléfonos móviles e inclusive los sensores ambientales genera millones de datos de forma continua en cualquier momento y lugar, y requiere de algoritmos de IA para su procesamiento y generación de modelos predictivos para una medicina más personalizada.

En el esquema siguiente se visualiza el papel de la IA en la salud móvil y medicina personalizada en los procesos de diagnóstico y planificación de la terapia por medio de tres elementos fundamentales: 1) La monitorización inteligente mediante dispositivos médicos y wearables que recogen grandes cantidades de información sobre la salud del paciente en el contexto de la vida diaria; 2) La extracción de conocimiento a partir de

los datos registrados, por medio de algoritmos que permiten evaluar el estado del paciente, prediciendo eventos de riesgo, e identificando patrones anómalos o trayectorias de tratamiento; 3) Los asistentes inteligentes, que proporcionan apoyo al paciente en su vida diaria, fomentan el autocuidado, humanizan la comunicación por medio del lenguaje natural y proporcionan un mayor nivel de personalización. Las plataformas de salud digital proporcionan una atención personalizada más completa, optimizando el soporte a la toma de decisiones gracias a la IA. **Esquema 2.**

La estructura de los 3 subapartados del capítulo sigue un modelo común, al destacar el impacto de la inteligencia artificial (IA) en cada una de las tecnologías, su evolución en los últimos años y su creciente integración en la práctica clínica. También se contextualizará el avance desde el uso actual de la IA hacia los desafíos y oportunidades futuras que nos presenta la IA generativa.



Esquema 2

2. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LAS IMÁGENES MÉDICAS

En el campo de la imagen médica, la IA está aportando grandes mejoras en la precisión diagnóstica, la eficiencia y la atención al paciente. La IA se está posicionando como la última tecnología transformadora en este campo, en su capacidad de analizar grandes cantidades de datos complejos de imágenes médicas. Su capacidad para procesar e interpretar estas vastas cantidades de datos de imágenes médicas complejas ofrece perspectivas sin precedentes para mejorar la práctica clínica¹.

La integración de la IA representa un cambio de paradigma en la forma en que se realiza e interpreta la imagen médica. Ofrece nuevas herramientas para no depender únicamente de la experiencia humana para la interpretación, al potenciar la automatización y el análisis cuantitativo de las imágenes, modificando el flujo de trabajo y potencialmente el rol de los profesionales médicos. Esto sugiere una transición hacia un sistema de atención médica más integrado con la tecnología.

La colaboración entre los ingenieros biomédicos que desarrollan soluciones de IA en tecnologías sanitarias y los profesionales médicos es esencial para la exitosa incorporación de la IA en la imagen médica. Esta colaboración hace posible que los algoritmos de IA sean entrenados con datos reales y validados por expertos médicos para asegurar su relevancia clínica y precisión. A su vez, las herramientas de IA pueden asistir a los profesionales médicos en sus tareas clínicas, lo que evidencia una relación simbiótica. La eficacia de la IA en la imagen médica depende en gran medida de la disponibilidad de conjuntos de datos extensos, de alta calidad y diversos, representativos de la población real. Esto subraya la importancia de iniciativas internacionales de recopilación, anotación e intercambio de datos.

Esta sección tiene como objetivo proporcionar una visión general de las aplicaciones de la IA en la imagen médica, tanto en sus usos actuales como en el ámbito de la IA generativa. Se exploran las formas en que la IA optimiza la calidad y la eficiencia en la adquisición y reconstrucción de imágenes, así como su papel en la segmentación, la detección, la clasificación y el diagnóstico automatizado. Además, se analizará el concepto de la radiómica y la extracción de biomarcadores para los modelos de clasificación y predicción basados en IA, junto

con las aplicaciones de la IA generativa en la creación de imágenes sintéticas y el aumento de datos. Finalmente, se examinará la función de los modelos de lenguaje en la interpretación y explicabilidad de la imagen médica, abordando tanto los desafíos como las oportunidades futuras que la IA presenta para este campo.

2.1 Aplicaciones actuales de la IA en imagen médica

La IA, haciendo referencia en este contexto a los algoritmos de aprendizaje automático (*machine learning*, ML) y su subcategoría aprendizaje profundo (*deep learning*, DL) cuenta con numerosas aplicaciones actuales. El análisis de imágenes médicas se ha visto especialmente beneficiado por el desarrollo de las técnicas de DL, lo que ha llevado a un aumento exponencial en artículos científicos publicados desde el año 2011 en los que se emplean la IA en tareas de clasificación y segmentación, entre otros tipos de aplicaciones (**Figura 1**).

2.1.1. Optimización de la calidad y eficiencia en la adquisición y reconstrucción de imágenes

La IA está transformando significativamente la adquisición y procesamiento de imágenes médicas. Así, permite optimizar tanto la calidad como la eficiencia en múltiples modalidades.

En **RM**, la IA ha demostrado ser una herramienta clave para mejorar la calidad de imagen, aumentando la nitidez y la relación señal-ruido (SNR), lo que permite diagnósticos más precisos incluso en condiciones de adquisición exigentes. Los algoritmos de reconstrucción basados en IA también permiten obtener imágenes de alta calidad con dosis más bajas, acelerando el proceso sin comprometer el valor diagnóstico³. Además, la reconstrucción mediante aprendizaje profundo (DLR) han permitido reducir los tiempos de adquisición hasta en un 53%, lo que beneficia tanto a pacientes como a los servicios de radiología⁴.

En el caso de la **CT**, la IA permite mejorar el proceso del posicionamiento del paciente, resultando en una mejora en la calidad de la imagen y tiempo de adquisición y una reducción en la dosis necesaria. Aunque dosis menores resultan en una reducción de la SNR, DLR en CT permite la reconstrucción de imágenes sin comprometer la precisión diagnóstica. Además, la IA

ofrece capacidades para mejorar la calidad de imagen mediante algoritmos de corrección del movimiento del paciente y reducción de ruido³.

La aplicación de IA en **radiografía** contribuye tanto a la mejora de la imagen como a la eficiencia en la interpretación clínica. La reducción de ruido empleando algoritmos de IA mejora la calidad de la imagen, especialmente en estudios de tórax⁵. Además, la IA aumenta la sensibilidad para la detección de hallazgos como fracturas o anomalías torácicas, acortando los tiempos de lectura y facilitando respuestas diagnósticas más ágiles^{6,7}.

En **medicina nuclear**, tanto en estudios PET como SPECT, la IA se emplea para la reconstrucción de imágenes a partir de adquisiciones de baja dosis o tiempos de adquisición reducidos, sin pérdida significativa de calidad diagnóstica⁸. Por ejemplo, existen sistemas comerciales que cuentan con técnicas de reconstrucción y reducción de ruido que mejoran la calidad de la imagen y la confianza diagnóstica. Además, en ocasiones se permite la corrección de atenuación en estudios PET mediante imágenes de RM, impulsando el uso de sistemas híbridos PET/RM⁸.

2.1.2 Segmentación de imágenes médicas asistida por IA

La segmentación de regiones de interés en imágenes médicas, como pueden ser tejidos y órganos de interés, lesiones o masas neoplásicas, es un paso crítico en su análisis. Una delineación precisa permite una caracterización cuantitativa y objetiva mientras que la inclusión o exclusión de zonas no pertenecientes a la región de interés puede tener implicaciones importantes en la interpretación. Mientras que la segmentación manual se basa en el amplio conocimiento experto del médico especialista, es un proceso que requiere mucho tiempo y está sujeto a variabilidad interoperador. Además, las técnicas tradicionales de segmentación automática basadas por ejemplo en detección de bordes o crecimiento de regiones presentan varias limitaciones, especialmente a la hora de delinear regiones complejas y generalización⁹.

La IA es capaz de automatizar y mejorar la robustez de la segmentación de imágenes médicas, lo cual es crucial para el diagnóstico y la planificación del tratamiento. La segmentación impulsada por IA mejora la precisión diagnóstica al proporcionar una delimitación consistente y precisa de estructuras complejas,

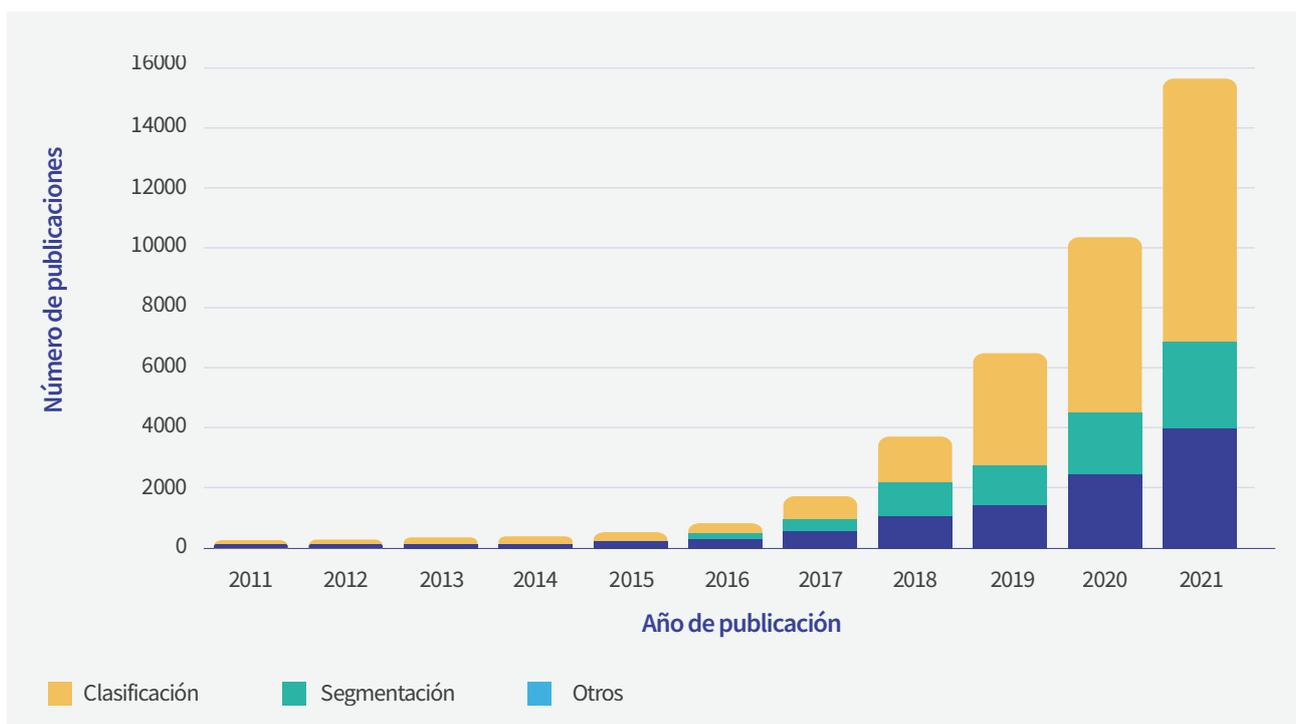


Figura 1. Número de artículos en PubMed empleando técnicas de DL en el análisis de imagen médica. Adaptada de Niyas et al.²

aumenta la eficiencia y reduce el tiempo necesario para la segmentación, lo que disminuye los costos y mejora el rendimiento y proporciona resultados de segmentación consistentes y reproducibles, eliminando la variabilidad interobservador.¹⁰ Las técnicas comunes para esta tarea incluyen redes neuronales convolucionales (CNN), redes neuronales residuales (ResNet), redes generativas antagónicas (GAN)⁹ La U-Net, propuesta por Ronneberger et al. en 2015¹¹, y sus variantes son arquitecturas CNN ampliamente utilizadas para la segmentación de imágenes médicas. Gracias a su modularidad y simplicidad es considerada el estándar en el contexto de la segmentación¹².

Los contextos de aplicación de la IA para tareas de segmentación son numerosos y se extienden a todas las modalidades de imagen médica. Así, se han empleado para segmentaciones en el cerebro, el ojo, órganos del tórax y del abdomen, el sistema cardiovascular o la piel, y especialmente para tumores y metástasis. El rango de modalidades de imagen con aplicaciones de IA para la segmentación incluye radiografía, CT (**Figura 2**), RM, US, medicina nuclear, microscopía e imágenes dermatológicas¹⁰. En función del entrenamiento de los modelos de IA, éstos también son capaces de realizar segmentaciones multiórgano. Herramientas como TotalSegmentator,

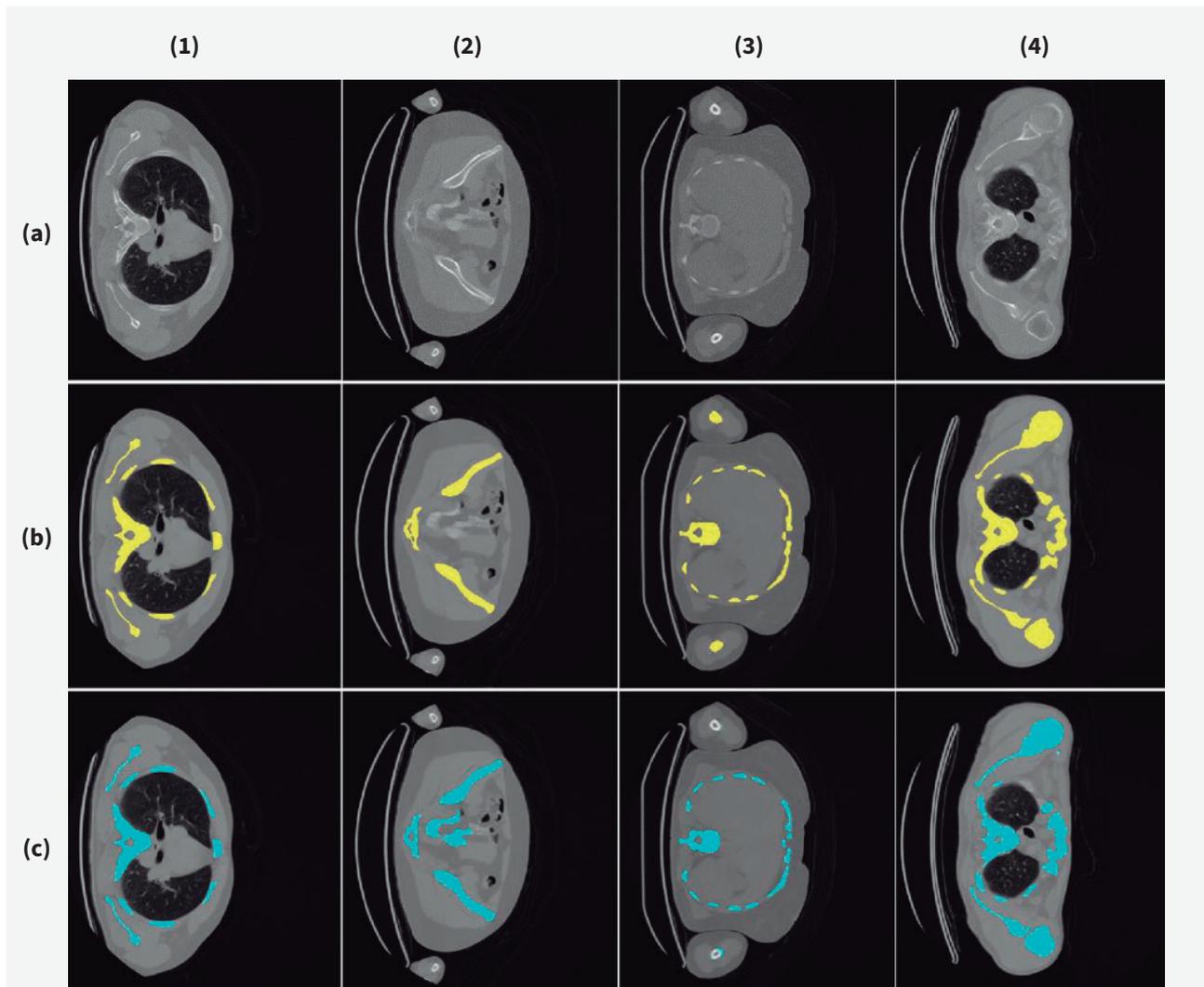


Figura 2. Ejemplos de resultados de segmentación mediante U-Net del esqueleto en imagen CT. (a) Corte axial de la imagen CT original. (b) Ground truth de la segmentación del esqueleto en amarillo. (c) Segmentación de la U-Net. Caso (1): Segmentación correcta. Caso (2): Segmentación con estructuras incorrectas. Caso (3): Segmentación con estructuras ausentes. Caso (4): Segmentación con estructuras incompletas. Adaptada de Milara et al.¹⁸.

basado en la arquitectura nnU-Net¹³, son capaces de segmentar 104 estructuras anatómicas a partir de imágenes CT¹⁴ y 50 a partir de RM¹⁵. Esta segmentación multiclase también es de especial interés en el contexto de la composición corporal, ya que permite obtener una visión global y objetiva de la extensión de los tejidos muscular y adiposo, crítica en el diagnóstico y la monitorización de la sarcopenia y la caquexia^{16,17}.

2.1.3. Detección, clasificación y diagnóstico automatizado con IA

La inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta poderosa para mejorar tanto la precisión como la eficiencia diagnóstica en distintas modalidades de imagen médica. En particular, los algoritmos de IA permiten detectar con alta precisión anomalías como nódulos pulmonares o lesiones mamarias en estudios como la CT, radiografía o la RM^{19,20}. Gracias al reconocimiento automatizado de patrones visuales, la IA puede asistir a los clínicos, reduciendo su tiempo de lectura en 17%²¹. Esta capacidad resulta clave para el diagnóstico temprano de enfermedades prevalentes, especialmente en el screening de cáncer^{19,20,22}.

Revisando otros contextos clínicos, en oftalmología, por ejemplo, se han desarrollado modelos de IA para detectar retinopatía diabética en imágenes de fondo de ojo²³. De manera similar, en dermatología, la IA alcanza niveles de precisión equiparables a los dermatólogos en la detección de melanomas a partir de imágenes de dermatoscopia, con resultados comparables o incluso mejores que dermatólogos²⁴. En neurología, los sistemas basados en IA para el análisis de neuroimagen pueden apoyar en el diagnóstico de enfermedades neurodegenerativas como la Enfermedad de Alzheimer o la Enfermedad de Parkinson²⁵. Además, se recomienda la integración de herramientas de IA en la práctica clínica para tareas como la detección automatizada de fracturas en radiografías, lo que permite reducir tiempos de diagnóstico y aumentar la sensibilidad en entornos de alta demanda²⁶.

2.1.4. Radiómica: El análisis cuantitativo de imagen médica

Generalmente, el análisis de regiones de interés en las imágenes médicas se limita a una interpretación visual, complementada por algunas características cuantitativas simples como el tamaño de la región o la

actividad metabólica. Sin embargo, las imágenes médicas pueden ofrecer una gran cantidad de información cuantitativa y objetiva, permitiendo la caracterización más completa que la proporcionada por muestras individuales de tejidos de biopsias y de patrones, incluso invisibles al ojo humano en la interpretación visual^{27,28}.

El campo de la radiómica se centra en la extracción de estas características cuantitativas y su posterior uso en modelos de IA. Estos modelos radiómicos impulsados por IA pueden soportar los procesos de diagnóstico y monitorización, y predecir las respuestas de los pacientes a distintos tipos de tratamiento. Así, la radiómica desempeña un papel relevante en la medicina de precisión y personalizada al proporcionar biomarcadores de imagen y actuar como herramienta de biopsia virtual^{27,28}. Pero la IA no es solo una herramienta esencial para aprovechar estas características una vez extraídas. Revisando los pasos de una metodología radiómica típica, la IA también puede ayudar en los pasos previos asociados a la adquisición de las imágenes (Optimización de la calidad y eficiencia en la adquisición y reconstrucción de imágenes) y la segmentación de la región de interés (Segmentación de imágenes médicas asistida por IA)²⁸.

Partiendo de la hipótesis de que estas características reflejan la biología subyacente, unos de sus principales campos de aplicación es la oncología, reflejado en la gran cantidad de estudios científicos frente a otros campos de aplicación (**Figura 3**). En este contexto, las características radiómicas son empleadas para cuantificar la heterogeneidad inter e intratumoral, relacionada con la agresividad, pronóstico y respuesta al tratamiento²⁹.

Los desafíos en la investigación de la radiómica para proporcionar modelos basados en IA robustos incluyen la estandarización de datos, la reproducibilidad y la validación. Algunas de las fuentes de variabilidad en la extracción de las características corresponden a estudios centrados en estudiar la robustez de las características radiómicas de distintas modalidades como CT³⁰, RM³¹ y PET³², apareciendo la Image Biomarker Standardization Initiative (IBSI) con el objetivo de estandarizar el cálculo³³. Por otro lado, la falta de transparencia en la documentación de los estudios radiómicos y los modelos de IA creados ha llevado a la creación de guías CLEAR (CheckList for Evaluation of Radiomics Research)³⁴ para mejorar la estructuración y consistencia, facilitando la reproducibilidad, y el “Radiomics Quality Score” (RQS)³⁵.

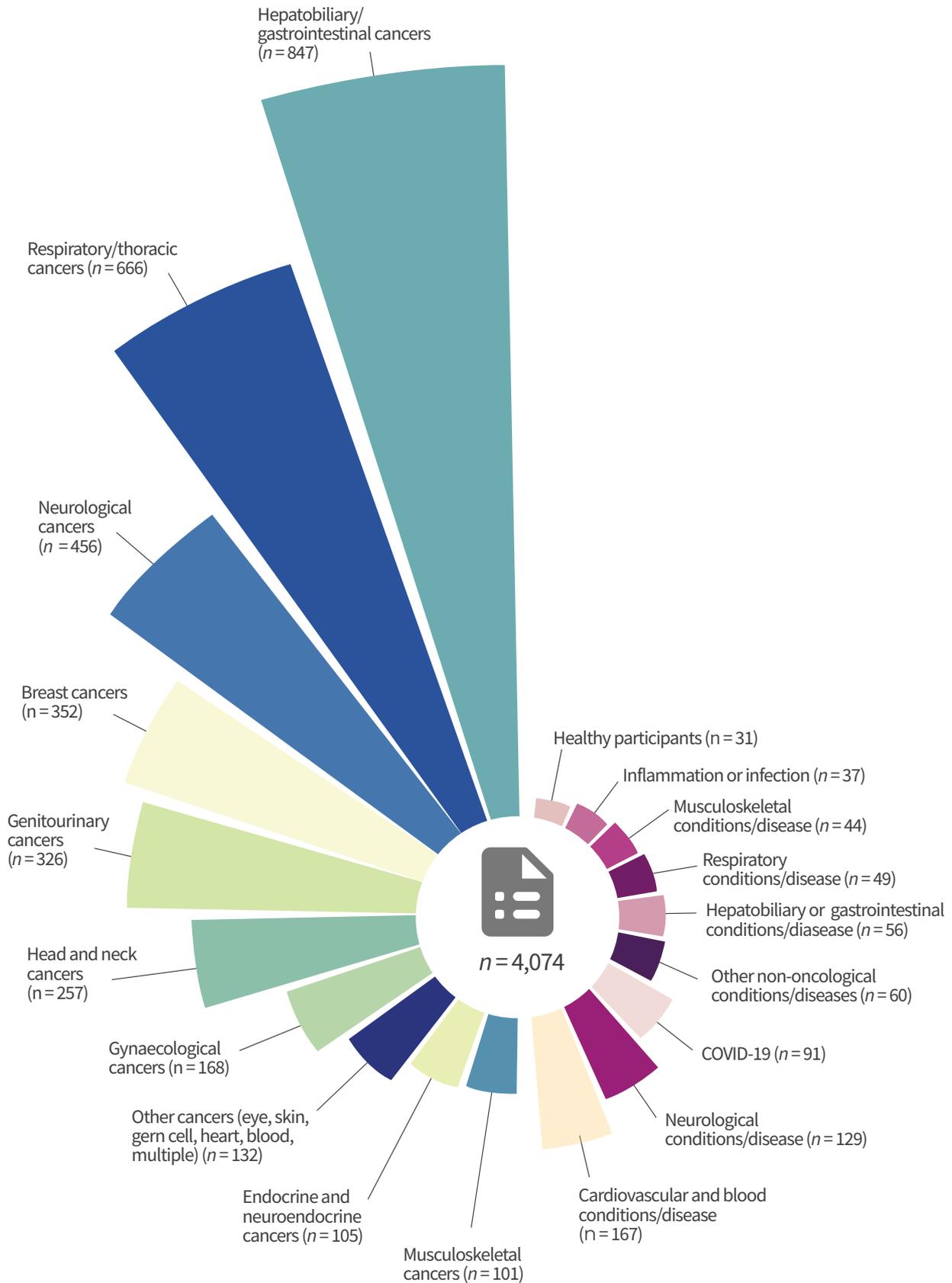


Figura 3. Número de estudios oncológicos y no oncológicos empleando análisis radiómico. Adaptado de McCague et al.²⁸

Una vez caracterizados los pacientes mediante las variables radiómicas, se pueden emplear técnicas de IA tanto supervisadas (algoritmos de ML como máquinas de soporte vectorial, árboles de decisión, perceptrones multicapa, entre otros) como no supervisadas (por ejemplo, agrupamiento K-medias) para generar modelos que relacionan los datos de imagen con eventos clínicos³⁶. Como muestra la Figura 3, los campos clínicos de aplicación son múltiples y así también lo son las modalidades de imagen empleadas en los estudios radiómicos.

En oncología, se ha explorado la utilidad de los modelos de IA basados en radiómica para la predicción patológica y radiológica en tratamientos como quimioterapia, radioterapia e inmunoterapia haciendo uso de CT³⁷, RM³⁸ y PET³⁹. Además, recientemente ha surgido el concepto de teragnosis, combinando el uso de radiofármacos marcados con radioisótopos emisores de positrones para imagen de medicina nuclear y radioisótopos emisores de partículas beta o alfa para terapia dirigida con radioligandos. Aunque la radiómica en el contexto de la teragnosis todavía está poco explorada, los modelos de IA pueden aportar, por ejemplo, información en la selección de pacientes candidatos y personalizar la estratificación del riesgo⁴⁰. Por otro lado, el valor de los modelos radiómicos también reside en su uso para realizar biopsias virtuales, permitiendo identificar características histológicas o moleculares de manera no invasiva. En este contexto, se pueden resaltar los modelos para predecir el tipo histológico en tumores pulmonares, la expresión de PD-L1 o el análisis cuantitativo de la médula ósea para detectar su infiltración en cánceres hematológicos^{41,42}.

En contextos clínicos no relacionados con la oncología, se pueden resaltar la neurología, dermatología y cardiología. En el campo de la neurología, y aparte de la caracterización de tumores cerebrales, los modelos de IA basados en los datos radiómicos son capaces de, por ejemplo, identificar a pacientes con epilepsia del lóbulo temporal a partir de imágenes PET preoperatorias⁴³. La inclusión del análisis radiómico al análisis de imágenes dermatoscópicas ha permitido mejorar resultados de clasificación de lesiones dermatológicas⁴⁴. Y por último, el análisis radiómico mediante modelos de IA no supervisados ha sido capaz de detectar patrones de actividad metabólica miocárdica distintos en pacientes tratados con quimioterapia, contribuyendo así la IA al campo de la onco-cardiología³².

2.2. Aplicaciones de la IA generativa en la imagen médica

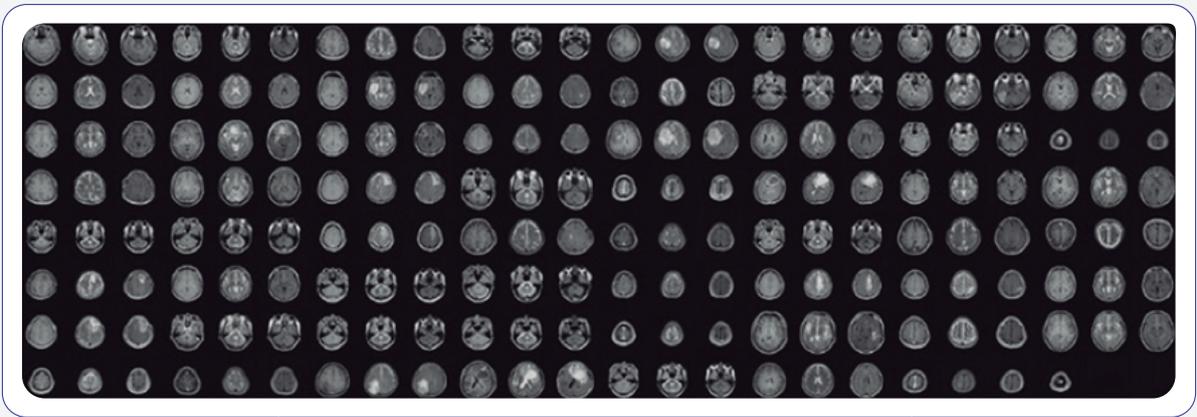
La inteligencia artificial generativa ha emergido como una de las áreas más prometedoras dentro del campo de la inteligencia artificial aplicada a la imagen médica. A través de modelos capaces de generar contenido visual sintético con alto grado de realismo y coherencia clínica, esta tecnología está transformando la forma en que se simulan escenarios complejos para la formación médica y el desarrollo de herramientas más robustas de apoyo al diagnóstico. Además, permite aumentar la explicabilidad de los modelos generados y la interpretación computacional de las imágenes. Así, el trabajo de Jung et al.⁴⁵ ha identificado dos enfoques en el uso de la IA generativa en el ámbito de la radiología: (1) empleando las imágenes sintéticas directamente y (2) usando las imágenes sintéticas para conjuntos de datos de entrenamiento de otros modelos de IA (Figura 4).

2.2.1. Generación de imágenes sintéticas

La generación de datos sintéticos en el ámbito de la imagen médica presenta varias ventajas tanto para la investigación como para la formación. Para ello, la IA generativa permite sintetizar imágenes médicas tanto de diversos órganos como en diferentes modalidades. Esta capacidad resulta especialmente útil para abordar la escasez de datos disponibles y los problemas relacionados con la privacidad del paciente⁴⁶.

Los modelos de IA generativa como las redes generativas antagónicas (GAN) y los modelos de difusión se utilizan para crear imágenes médicas realistas, contribuyendo así al aumento de conjuntos de datos limitados. Estas imágenes sintéticas no solo permiten reforzar el entrenamiento de los modelos, sino también mitigar sesgos en los datos originales y proteger tanto la seguridad como la confidencialidad de los pacientes. Además, la generación de datos sintéticos ofrece una solución viable en el caso de enfermedades raras, donde los datos reales son escasos o difíciles de obtener. De esta manera, el aumento de datos mediante IA generativa, incluyendo tanto GAN como modelos de difusión, se ha convertido en una estrategia clave para mejorar la robustez y la capacidad de generalización de los modelos en imagen médica. Los modelos de IA generativa son capaces de generar muestras sintéticas diversas y representativas, lo que repercute positivamente en el

Generated images



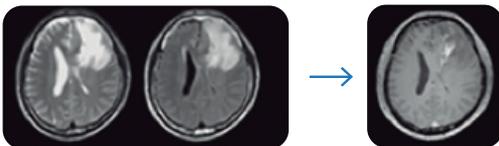
Approach I: Direct Utilization

Approach II: Generated images as training set

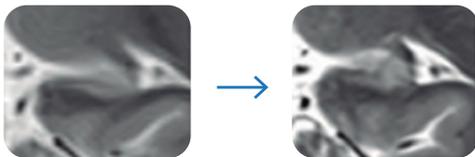
Fill in for missing data



Reduction of contrast media

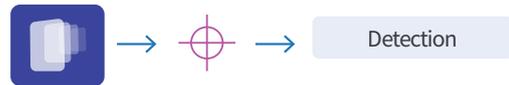


Denosing or creating super-resolution images



Concerns about introducing new features

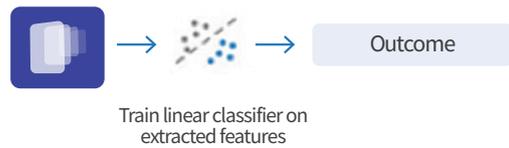
Deep learning-based detection



Deep learning-based segmentation



Deep learning-based classification



Perform image-based clinical tasks

Figura 4. Utilidad clínica de la IA generativa. Adaptada de Jung et al.⁴⁵

rendimiento del modelo. Finalmente, combinar datos reales con datos sintéticos durante el entrenamiento puede mejorar de forma significativa los resultados en tareas como la segmentación médica⁴⁵.

Desde una perspectiva formativa, las imágenes médicas sintéticas representan una herramienta valiosa para la educación médica, ya que posibilitan la enseñanza sin comprometer la privacidad de los pacientes⁴⁷. Además, la IA generativa podría permitir crear una amplia variedad de casos clínicos, incluyendo situaciones atípicas o complejas, lo que enriquece significativamente la formación médica al ofrecer escenarios más completos y variados para el aprendizaje. No obstante, su uso plantea ciertos desafíos, como garantizar el realismo, así como evaluar adecuadamente el rendimiento de los modelos entrenados con este tipo de datos. Cabe destacar también que las imágenes médicas son interpretadas en combinación con la historia clínica de los pacientes, así como sus datos demográficos, para obtener una visión más holística del caso. En este contexto, los modelos de visión-lenguaje (VLM) pueden aportar un enfoque multimodal⁴⁸, generando informes estructurados a partir de imágenes e imágenes a partir de breves textos⁴⁹.

2.2.2. Modelos de Lenguaje en la interpretación y explicabilidad de la imagen médica

Los modelos de lenguaje de gran escala (LLM) están transformando el campo de la imagen médica al permitir la interpretación conjunta de texto e imágenes para la generación automatizada de informes imagenológicos⁵⁰the emergence of transformer-based large language models (LLMs. Además, el procesamiento del lenguaje natural (PLN) desempeña un papel clave en el análisis e interpretación de los textos clínicos, ya que permite extraer y estructurar información relevante contenida en los informes⁵¹.

Una de las aplicaciones más prácticas de los LLM en el ámbito de la imagen médica es la creación de borradores preliminares de informes, lo que puede reducir de forma significativa los tiempos de lectura y dictado para los expertos clínicos, reduciendo en casi la mitad el tiempo necesario para elaborar un informe de una radiografía torácica⁵². Esta automatización no pretende reemplazar al especialista, sino actuar como un asistente inteligente que optimiza los flujos de trabajo y mejora la eficiencia operativa.

Más allá de los LLMs, los métodos de IA explicativa (XAI) contribuyen a aumentar la transparencia de los modelos diagnósticos, al ofrecer interpretaciones comprensibles sobre cómo se han alcanzado determinadas conclusiones diagnósticas. Gracias a ello, los hallazgos de la IA pueden ser comunicados tanto a profesionales de la salud como a pacientes de manera clara y adaptada al contexto clínico. Además, la XAI permite aumentar la confianza diagnóstica de los profesionales médicos y la aceptación de los modelos de IA^{53,54}.

No obstante, el uso de LLM en estos contextos todavía enfrenta desafíos importantes, como la posibilidad de generar respuestas incorrectas o inconsistentes —conocidas como “alucinaciones”—, que deben ser mitigadas mediante estrategias de validación rigurosas. Para optimizar su rendimiento en contextos clínicos, estos modelos deben ser entrenados o ajustados utilizando datos médicos específicos y controlados⁵⁰.

En definitiva, los modelos de lenguaje y la XAI pueden ser una interfaz fundamental entre los modelos diagnósticos basados en IA y la práctica clínica, al traducir información técnica en contenido procesable y comprensible. Esta capacidad no solo mejora la confianza en las herramientas de IA, sino que también permite avanzar hacia una medicina más transparente, colaborativa y centrada en el paciente.

2.3. Desafíos y oportunidades para la IA en imagen médica

A pesar de su creciente potencial, la adopción de la IA en imagen médica todavía enfrenta numerosas barreras. Entre ellas, destaca la reticencia de algunos profesionales a incorporar estas herramientas, motivada por la falta de un beneficio percibido claro en la práctica clínica. Esta resistencia se ve agravada por la naturaleza de “caja negra” de muchos modelos de IA, cuya escasa interpretabilidad genera desconfianza.

Desde el punto de vista técnico, la necesidad de grandes volúmenes de datos anotados para entrenar modelos de aprendizaje profundo constituye un desafío importante. Además, persisten dificultades en la estandarización de los datos, la infraestructura tecnológica y la reproducibilidad de resultados, especialmente en campos como la radiómica.

A nivel ético y regulatorio, surgen preocupaciones



en torno al sesgo algorítmico, la privacidad de los datos y posibles errores diagnósticos. La validación en entornos clínicos reales sigue siendo una exigencia crítica para garantizar la seguridad y eficacia de las herramientas de IA. Si la integración no se planifica cuidadosamente, podría incluso aumentar la carga de trabajo y el riesgo de errores operativos.

Asimismo, el riesgo de sesgo de automatización y una dependencia excesiva de los sistemas automatizados plantea un nuevo tipo de vulnerabilidad en la práctica médica. Integrar herramientas de IA con los sistemas clínicos existentes supone también desafíos técnicos y logísticos, incluyendo costos elevados, contratación con múltiples proveedores y la necesidad de garantizar ciberseguridad y privacidad.

Por último, la eficacia a largo plazo de la IA en el

entorno clínico requiere un seguimiento constante, así como mecanismos de validación continua para evitar la degradación de su rendimiento. Esto incluye abordar el sesgo derivado de datos de entrenamiento no representativos, que puede afectar la equidad y generalización de los modelos.

Frente a estos desafíos, la IA también cuenta con un gran número de ventajas y oportunidades prometedoras en imagen médica, algunas de ellas ya descritas en esta sección. Su capacidad para automatizar tareas repetitivas permite optimizar los flujos de trabajo en imagen médica, mejorando tanto la eficiencia como la precisión diagnóstica. Mejorar la detección precoz en las fases de screening puede redistribuir los estadios al diagnóstico, disminuir el número de visitas y biopsias, aumentando las probabilidades de tratamientos exitosos y tiempos de



Para generar confianza en los modelos de IA para el análisis automatizado de la imagen médica, es crucial abordar los posibles sesgos en los algoritmos, proteger la privacidad de los datos de los pacientes y establecer líneas claras de responsabilidad para los diagnósticos asistidos por la IA

supervivencia. Los LLMs pueden apoyar la redacción de informes de imagen y aliviar la carga documental de los profesionales. Al reducir los tiempos hasta el diagnóstico y el coste de los procedimientos, la IA puede aportar un valor añadido tangible al sistema de salud. Mediante algoritmos de priorización, la IA puede identificar los casos urgentes, lo que no solo mejora los tiempos de respuesta, sino que también ayuda a mitigar el agotamiento profesional. En combinación con otras fuentes de información clínica, la IA favorece un enfoque más personalizado de la atención al paciente, integrando datos de imagen con antecedentes médicos y biomarcadores. Esta integración multimodal permite construir una visión más completa del estado de salud del paciente.

El futuro de la IA en la imagen médica requiere un abordaje multidisciplinar. Si bien la IA puede automatizar muchas tareas y proporcionar información valiosa, la interpretación de las imágenes médicas, especialmente en casos complejos, todavía requiere la experiencia humana y el juicio clínico. Los marcos éticos y las regulaciones sólidas son esenciales para garantizar un desarrollo y una implementación responsables de la IA en la rutina clínica. Para generar confianza en los modelos de IA para el análisis automatizado de la imagen médica, es crucial abordar los posibles sesgos en los algoritmos, proteger la privacidad de los datos de los pacientes y establecer líneas claras de responsabilidad para los diagnósticos asistidos por la IA. Esto requiere la colaboración entre ingenieros biomédicos expertos en IA, profesionales médicos y responsables de la formulación de políticas y éticos. El campo de la IA en la imagen médica está evolucionando rápidamente, lo que requiere investigación, desarrollo y adaptación continuos para

superar los desafíos y realizar plenamente su potencial.

En resumen, la IA está transformando el campo de la imagen médica a través de una amplia gama de aplicaciones actuales y emergentes. Desde la optimización de la calidad y la eficiencia de la imagen hasta la automatización del diagnóstico y la extracción de información cuantitativa mediante la radiómica, la IA está mejorando significativamente la práctica médica. Para promover la transparencia y reproducibilidad de los desarrollos de IA en imagen médica, se están proponiendo guías como CLAIM (*Checklist for AI in Medical Imaging*)⁵⁵ con el objetivo de proporcionar recomendaciones de buenas prácticas de documentación de los avances científicos. La aparición de la IA generativa abre nuevas posibilidades para la creación de datos sintéticos y el aumento de conjuntos de datos, mientras que los modelos de lenguaje y los métodos de XAI mejoran la interpretación y la explicabilidad de los hallazgos.

El futuro de la IA en la imagen médica es prometedor, con el potencial de revolucionar la atención médica y mejorar los resultados de los pacientes. Las empresas especializadas en imagen médica han identificado el potencial de la IA y están empezando a integrarla en sus sistemas. Al aprovechar el poder de la IA y facilitar su uso e integración en los hospitales, los profesionales de la salud pueden lograr diagnósticos más precisos y tempranos, planes de tratamiento personalizados y flujos de trabajo optimizados, lo que en última instancia conduce a una atención más eficaz y eficiente. Sin duda alguna, la IA en la imagen médica está preparada para desempeñar un papel central en la atención médica del futuro.



2.4. Referencias

- **1.** Obuchowicz R, Strzelecki M, Piórkowski A. Clinical Applications of Artificial Intelligence in Medical Imaging and Image Processing—A Review. *Cancers (Basel)*. 2024;16(10):1870. doi:10.3390/CANCERS16101870
- **2.** Niyas S, Pawan SJ, Anand Kumar M, Rajan J. Medical image segmentation with 3D convolutional neural networks: A survey. *Neurocomputing*. 2022;493:397-413. doi:10.1016/J.NEUCOM.2022.04.065
- **3.** Mastrodicasa D, van Assen M, Huisman M, et al. Use of AI in Cardiac CT and MRI: A Scientific Statement from the ESCR, EuSoMII, NASCI, SCCT, SCMR, SIIM, and RSNA. *Radiology*. 2025;314(1):e240516. doi:10.1148/RADIOL.240516
- **4.** Yang A, Finkelstein M, Koo C, Doshi AH. Impact of Deep Learning Image Reconstruction Methods on MRI Throughput. *Radiol Artif Intell*. 2024;6(3). doi:10.1148/RYAI.230181
- **5.** Yoon SH, Kim J, Kim J, et al. Improving Image Quality of Chest Radiography with Artificial Intelligence-Supported Dual-Energy X-Ray Imaging System: An Observer Preference Study in Healthy Volunteers. *J Clin Med*. 2025;14(6):2091. doi:10.3390/JCM14062091/S1
- **6.** Raj SD, Sadegi B, Simon J. Radiologist workload reprioritization utilizing artificial intelligence: measuring turnaround time for fracture detection on MSK X-rays sourced from a nationwide outpatient imaging practice. In: *RSNA 2023 109th Scientific Assembly and Annual Meeting*. ; 2023.
- **7.** Bannani S, Regnard NE, Ventre J, et al. Using AI to Improve Radiologist Performance in Detection of Abnormalities on Chest Radiographs. *Radiology*. 2023;309(3). doi:10.1148/RADIOL.230860
- **8.** Lopes L, Lopez-Montes A, Chen Y, et al. The Evolution of Artificial Intelligence in Nuclear Medicine. *Semin Nucl Med*. 2025;55(3):313-327. doi:10.1053/J.SEMNUCLMED.2025.01.006
- **9.** Teng Z, Li L, Xin Z, et al. A literature review of artificial intelligence (AI) for medical image segmentation: from AI and explainable AI to trustworthy AI. *Quant Imaging Med Surg*. 2024;14(12):9620-9652. doi:10.21037/QIMS-24-723/COIF
- **10.** Liu X, Song L, Liu S, Zhang Y. A Review of Deep-Learning-Based Medical Image Segmentation Methods. *Sustainability*. 2021;13(3):1224. doi:10.3390/SU13031224
- **11.** Ronneberger O, Fischer P, Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Vol 9351. Springer Verlag; 2015:234-241. doi:10.1007/978-3-319-24574-4_28
- **12.** Azad R, Aghdam EK, Rauland A, et al. Medical Image Segmentation Review: The Success of U-Net. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*. Published online 2024. doi:10.1109/TPAMI.2024.3435571
- **13.** Isensee F, Jaeger PF, Kohl SAA, Petersen J, Maier-Hein KH. nnU-Net: a self-configuring method for deep learning-based biomedical image segmentation. *Nat Methods* 2020 182. 2020;18(2):203-211. doi:10.1038/s41592-020-01008-z
- **14.** Wasserthal J, Breit HC, Meyer MT, et al. TotalSegmentator: Robust Segmentation of 104 Anatomic Structures in CT Images. *Radiol Artif Intell*. 2023;5(5). doi:10.1148/RYAI.230024
- **15.** Akinci D'Antonoli T, Berger LK, Indrakanti AK, et al. TotalSegmentator MRI: Robust Sequence-independent Segmentation of Multiple Anatomic Structures in MRI. *Radiology*. 2025;314(2):e241613. doi:10.1148/RADIOL.241613
- **16.** Ackermans LLGC, Volmer L, Wee L, et al. Deep Learning Automated Segmentation for Muscle and Adipose Tissue from Abdominal Computed Tomography in Polytrauma Patients. *Sensors*. 2021;21(6):2083. doi:10.3390/s21062083
- **17.** Kreher R, Hille G, Preim B, et al. Multilabel segmentation and analysis of skeletal muscle and adipose tissue in routine abdominal CT scans. *Comput Biol Med*. 2025;186:109622. doi:10.1016/J.COMPBIOMED.2024.109622
- **18.** Milara E, Gómez-Grande A, Sarandeses P, Seiffert AP, Gómez EJ, Sánchez-González P. Automatic Skeleton Segmentation in CT Images Based on U-Net. *J Imaging Informatics Med*. Published online April 30, 2024:1-11. doi:10.1007/S10278-024-01127-5



- **19.** de Margerie-Mellon C, Chassagnon G. Artificial intelligence: A critical review of applications for lung nodule and lung cancer. *Diagn Interv Imaging.* 2023;104(1):11-17. doi:10.1016/J.DIII.2022.11.007
- **20.** Díaz O, Rodríguez-Ruíz A, Sechopoulos I. Artificial Intelligence for breast cancer detection: Technology, challenges, and prospects. *Eur J Radiol.* 2024;175:111457. doi:10.1016/J.EJRAD.2024.111457
- **21.** Najjar R. Redefining Radiology: A Review of Artificial Intelligence Integration in Medical Imaging. *Diagnostics.* 2023;13(17):2760. doi:10.3390/DIAGNOSTICS13172760
- **22.** Eisemann N, Bunk S, Mukama T, et al. Nationwide real-world implementation of AI for cancer detection in population-based mammography screening. *Nat Med* 2025 313. 2025;31(3):917-924. doi:10.1038/s41591-024-03408-6
- **23.** Kong M, Song SJ. Artificial Intelligence Applications in Diabetic Retinopathy: What We Have Now and What to Expect in the Future. *Endocrinol Metab.* 2024;39(3):416-424. doi:10.3803/ENM.2023.1913
- **24.** Patel RH, Foltz EA, Witkowski A, Ludzik J. Analysis of Artificial Intelligence-Based Approaches Applied to Non-Invasive Imaging for Early Detection of Melanoma: A Systematic Review. *Cancers (Basel).* 2023;15(19):4694. doi:10.3390/CANCERS15194694
- **25.** Borchert RJ, Azevedo T, Badhwar AP, et al. Artificial intelligence for diagnostic and prognostic neuroimaging in dementia: A systematic review. *Alzheimer's Dement.* 2023;19(12):5885-5904. doi:10.1002/ALZ.13412
- **26.** National Institute for Health and Care Excellence. Artificial intelligence technologies to help detect fractures on X-rays in urgent care: early value assessment. Published 2025. Accessed April 22, 2025. <https://www.nice.org.uk/guidance/HTE20>
- **27.** Guiot J, Vaidyanathan A, Deprez L, et al. A review in radiomics: Making personalized medicine a reality via routine imaging. *Med Res Rev.* 2022;42(1):426-440. doi:10.1002/MED.21846
- **28.** McCague C, Ramlee S, Reinius M, et al. Introduction to radiomics for a clinical audience. *Clin Radiol.* 2023;78(2):83-98. doi:10.1016/J.CRAD.2022.08.149
- **29.** Gillies RJ, Kinahan PE, Hricak H. Radiomics: Images Are More than Pictures, They Are Data. *Radiology.* 2016;278(2):563-577. doi:10.1148/radiol.2015151169
- **30.** Shafiq-Ul-hassan M, Zhang GG, Latifi K, et al. Intrinsic dependencies of CT radiomic features on voxel size and number of gray levels. *Med Phys.* 2017;44(3):1050-1062. doi:10.1002/MP.12123
- **31.** Baeßler B, Weiss K, Santos DP Dos. Robustness and Reproducibility of Radiomics in Magnetic Resonance Imaging: A Phantom Study. *Invest Radiol.* 2019;54(4):221-228. doi:10.1097/RLI.0000000000000530
- **32.** Palomino-Fernández D, Seiffert AP, Gómez-Grande A, et al. Robustness of [18F]FDG PET/CT radiomic analysis in the setting of drug-induced cardiotoxicity. *Comput Methods Programs Biomed.* 2024;244:107981. doi:10.1016/J.CMPB.2023.107981
- **33.** Zwanenburg A, Vallières M, Abdalah MA, et al. The Image Biomarker Standardization Initiative: Standardized Quantitative Radiomics for High-Throughput Image-based Phenotyping. *Radiology.* 2020;295(2):328-338. doi:10.1148/RADIOL.2020191145
- **34.** Kocak B, Baessler B, Bakas S, et al. CheckList for Evaluation of Radiomics research (CLEAR): a step-by-step reporting guideline for authors and reviewers endorsed by ESR and EuSoMI. *Insights Imaging.* 2023;14(1):1-13. doi:10.1186/S13244-023-01415-8
- **35.** Lambin P, Leijenaar RTH, Deist TM, et al. Radiomics: the bridge between medical imaging and personalized medicine. *Nat Rev Clin Oncol.* 2017;14(12):749-762. doi:10.1038/NRCLINONC.2017.141
- **36.** Avanzo M, Wei L, Stancanello J, et al. Machine and Deep Learning Methods for Radiomics. *Med Phys.* 2020;47(5):e185. doi:10.1002/MP.13678
- **37.** Bernatowicz K, Amat R, Prior O, et al. Radiomics signature for dynamic monitoring of tumor inflamed microenvironment and immunotherapy response prediction. *J Immunother cancer.* 2025;13(1). doi:10.1136/JITC-2024-009140
- **38.** Crimì F, D'Alessandro C, Zanon C, et al. A Machine Learning Model Based on MRI Radiomics to Predict Response to Chemoradiation Among Patients with Rectal Cancer. *Life* 2024, Vol 14, Page 1530. 2024;14(12):1530. doi:10.3390/LIFE14121530



- **39.** Pedraza S, Seiffert AP, Sarandeses P, et al. The value of metabolic parameters and textural analysis in predicting prognosis in locally advanced cervical cancer treated with chemoradiotherapy. *Strahlentherapie und Onkol.* 2022;198:792-801. doi:10.1007/s00066-022-01900-x
- **40.** Filippi L, Urso L, Bianconi F, et al. Radiomics and theranostics with molecular and metabolic probes in prostate cancer: toward a personalized approach. *Expert Rev Mol Diagn.* 2023;23(3):243-255. doi:10.1080/14737159.2023.2192351
- **41.** Milara E, Alonso R, Maseing L, et al. Radiomics analysis of bone marrow biopsy locations in [18F] FDG PET/CT images for measurable residual disease assessment in multiple myeloma. *Phys Eng Sci Med.* 2023;46:903-913. doi:10.1007/S13246-023-01265-0
- **42.** Milara E, Sarandeses P, Jiménez-Ubieto A, et al. Machine Learning Models Based on [18F] FDG PET Radiomics for Bone Marrow Assessment in Non-Hodgkin Lymphoma. *Appl Sci.* 2024;14(22):10291. doi:10.3390/APP142210291
- **43.** Liao K, Wu H, Jiang Y, et al. Machine learning techniques based on 18F-FDG PET radiomics features of temporal regions for the classification of temporal lobe epilepsy patients from healthy controls. *Front Neurol.* 2024;15:1377538. doi:10.3389/FNEUR.2024.1377538/BIBTEX
- **44.** Wang Z, Wang C, Peng L, et al. Radiomic and deep learning analysis of dermoscopic images for skin lesion pattern decoding. *Sci Reports* 2024 14.1. 2024;14(1):1-13. doi:10.1038/s41598-024-70231-x
- **45.** Jung HK, Kim K, Park JE, Kim N. Image-Based Generative Artificial Intelligence in Radiology: Comprehensive Updates. *Korean J Radiol.* 2024;25(11):959-981. doi:10.3348/KJR.2024.0392
- **46.** Ibrahim M, Khalil Y Al, Amirrajab S, et al. Generative AI for synthetic data across multiple medical modalities: A systematic review of recent developments and challenges. *Comput Biol Med.* 2025;189:109834. doi:10.1016/J.COMPBIOMED.2025.109834
- **47.** Koetzier LR, Wu J, Mastrodicasa D, et al. Generating Synthetic Data for Medical Imaging. *Radiology.* 2024;312(3):e232471. doi:10.1148/RADIOL.232471
- **48.** Hong GS, Jang M, Kyung S, et al. Overcoming the Challenges in the Development and Implementation of Artificial Intelligence in Radiology: A Comprehensive Review of Solutions Beyond Supervised Learning. *Korean J Radiol.* 2023;24(11):1061-1080. doi:10.3348/KJR.2023.0393
- **49.** Moon JH, Lee H, Shin W, Kim YH, Choi E. Multi-Modal Understanding and Generation for Medical Images and Text via Vision-Language Pre-Training. *IEEE J Biomed Heal Informatics.* 2022;26(12):6070-6080. doi:10.1109/JBHI.2022.3207502
- **50.** Bhayana R. Chatbots and Large Language Models in Radiology: A Practical Primer for Clinical and Research Applications. *Radiology.* 2024;310(1). doi:10.1148/RADIOL.232756
- **51.** Cai T, Giannopoulos AA, Yu S, et al. Natural Language Processing Technologies in Radiology Research and Clinical Applications. *Radiographics.* 2016;36(1):176. doi:10.1148/RG.2016150080
- **52.** Babyn PS, Adams SJ. Harnessing the Power of Generative AI to Enhance Radiologist Efficiency and Accuracy. <https://doi.org/10.1148/radiol250339>. 2025;314(3):e250339. doi:10.1148/RADIOL.250339
- **53.** Chanda T, Hauser K, Hobelsberger S, et al. Dermatologist-like explainable AI enhances trust and confidence in diagnosing melanoma. *Nat Commun* 2024 15.1. 2024;15(1):1-17. doi:10.1038/s41467-023-43095-4
- **54.** Lai T. Interpretable Medical Imagery Diagnosis with Self-Attentive Transformers: A Review of Explainable AI for Health Care. *BioMedInformatics* 2024, Vol 4, Pages 113-126. 2024;4(1):113-126. doi:10.3390/BIOMEDINFORMATICS4010008
- **55.** Tejani AS, Klontzas ME, Gatti AA, et al. Checklist for Artificial Intelligence in Medical Imaging (CLAIM): 2024 Update. *Radiol Artif Intell.* 2024;6(4). doi:10.1148/RYAI.240300

3. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA ROBÓTICA MÉDICA

La Inteligencia Artificial (IA) ha revolucionado la robótica en el ámbito de la medicina, facilitando procedimientos más precisos y eficientes. Su aplicación abarca desde la cirugía asistida por robots hasta la personalización de tratamientos. Sin embargo, a pesar de los avances actuales, aún existen numerosas oportunidades de desarrollo e investigación en esta área. Esto es debido a que la integración de la IA en la robótica médica representa un cambio significativo en la forma en que se diseñan, controlan y utilizan los sistemas robóticos en entornos clínicos. A través del aprendizaje automático, la visión artificial y el procesamiento de lenguaje natural, la IA está permitiendo una adaptación más precisa al entorno quirúrgico, la personalización de terapias asistidas por robots y la mejora del rendimiento operativo de los mismos. Esta sinergia está redefiniendo la relación entre los profesionales sanitarios y los robots, orientando el sistema de salud hacia un enfoque más automatizado guiado por la IA.

Esta sección tiene como objetivo ofrecer una visión integral de las aplicaciones actuales de la IA en la robótica médica, con un enfoque especial en dos áreas clave: la cirugía asistida por robots y los sistemas robóticos aplicados a la neurorrehabilitación. Se analizará cómo la IA está optimizando la planificación quirúrgica, la ejecución de intervenciones mínimamente invasivas y la adaptación permanente. Asimismo, se explorará su papel en la personalización de terapias de rehabilitación mediante interfaces cerebro-computadora (BCI) y aprendizaje adaptativo, así como el potencial futuro y las limitaciones actuales de la IA generativa en el área.

3.1. Aplicaciones de IA en cirugía asistida por robots

La cirugía asistida por robots representa una de las áreas más avanzadas y prometedoras dentro de la integración de la IA en robótica. La IA está transformando profundamente este campo, aportando capacidades de automatización, precisión y adaptabilidad sin precedentes. Desde la planificación quirúrgica hasta la ejecución y monitorización en tiempo real, los sistemas quirúrgicos robóticos están redefiniendo el papel del cirujano y el

funcionamiento del quirófano moderno. Una de las claves para comprender esta evolución es la clasificación por niveles de autonomía quirúrgica, que permite identificar el grado de intervención de la IA en cada etapa del procedimiento. A medida que se desarrollan dispositivos cada vez más sofisticados, con capacidad para aprender de la experiencia y adaptarse a situaciones complejas, surgen también nuevos desafíos técnicos, éticos y regulatorios. Esta sección explora cómo la IA está impulsando la automatización de tareas quirúrgicas, mejorando la estabilidad de los sistemas robóticos, habilitando una monitorización continua del paciente y potenciando la cirugía mediante herramientas como la realidad aumentada.

3.1.1. Automatización de tareas quirúrgicas

La cirugía robótica autónoma representa un campo pionero dedicado a la integración de sistemas robóticos con diversos grados de autonomía para la ejecución de procedimientos quirúrgicos. Este cambio de paradigma es posible gracias a la progresiva integración de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en el ámbito de las intervenciones quirúrgicas. Si bien la mayoría de los sistemas robóticos autónomos se encuentran en fase experimental, un subconjunto considerable ha logrado la transición a aplicaciones clínicas. Procedimientos destacados, como la venopunción, los implantes capilares, la anastomosis intestinal, la artroplastia, el implante coclear y la radiocirugía, entre otros, ejemplifican las capacidades actuales de los sistemas quirúrgicos autónomos.

Los niveles de autonomía en robótica quirúrgica clasifican los robots quirúrgicos en función de su nivel de autonomía¹:

- **Nivel 0:** sin autonomía; la cirugía se hace totalmente manual.
- **Nivel 1:** asistencia robótica; el dispositivo robótico apoya al cirujano, pero es éste el que realiza y controla todos los movimientos del cirujano.
- **Nivel 2:** autonomía de tareas; el cirujano proporciona unos parámetros para la realización de tareas específicas que se preprograman con esos parámetros.
- **Nivel 3:** autonomía condicional; el robot es el que propone parámetros y estrategias para tareas específicas y las ejecuta.
- **Nivel 4:** autonomía de alto nivel; el robot propone un plan quirúrgico para el paciente y lo lleva a cabo de forma autónoma.



- **Nivel 5:** autonomía total; el robot no sólo propone y lleva a cabo el plan quirúrgico sino que, además, toma decisiones a lo largo del proceso quirúrgico.

Actualmente según Baker², el 86% de los dispositivos robóticos son de nivel 1, el 8% nivel 2 y el 6% de nivel 3. La IA juega un papel fundamental en esta automatización de las tareas como es el caso del robot Senhance que se utiliza en cirugía laparoscópica. En este dispositivo la cámara se ajusta automáticamente en función de la proximidad de los instrumentos quirúrgicos, lo que permite que el cirujano vea en cada momento la zona relevante de la cirugía. Esto ha supuesto un gran avance frente al manejo manual de la cámara endoscópica. Adicionalmente, este robot permite que el cirujano señale en la pantalla la zona anatómica clave como por ejemplo tejidos o vasos sanguíneos y así resaltarlas de forma visual o incluso, protegerlas para evitar el contacto accidental con los instrumentos robóticos. Además, proporciona herramientas para que el cirujano, en tiempo real, pueda tomar decisiones de forma más precisa tales como alertas visuales o auditivas³. También el dispositivo robótico ARTAS iX System que se usa en cirugía plástica y más en concreto en operaciones de implantación de pelo, utiliza algoritmos de inteligencia artificial para analizar, monitorizar y hacer el seguimiento de los folículos del pelo y ajustarse al movimiento del paciente en la intervención⁴. Además, proporciona información sobre el ángulo óptimo en el que introducir el folículo. Estos dos dispositivos se clasifican como nivel 2 y nivel 3 respectivamente.

3.1.2. Estabilidad del robot

Uno de los retos clave en la cirugía asistida por robots es garantizar la estabilidad y seguridad del robot quirúrgico. Los sistemas actuales incorporan sensores avanzados y algoritmos de control adaptativo para minimizar vibraciones y errores, pero aún se investiga en mejorar su autonomía y capacidad de respuesta en situaciones inesperadas. Se utilizan algoritmos de aprendizaje profundo para mejorar la precisión de los movimientos del robot como el sistema quirúrgico da Vinci. En este dispositivo, los algoritmos analizan el movimiento de los instrumentos quirúrgicos y pueden corregir cualquier temblor de forma automática, de tal manera que, si hay pequeños movimientos debidos al cansancio o a imperfecciones en el control del dispo-

sitivo, éstos puedan ser corregidos automáticamente. Adicionalmente, se pueden predecir los movimientos futuros de la mano del cirujano basándose en el histórico de movimientos previos, lo que permite adaptar los movimientos de la herramienta robótica haciendo su manejo al cirujano más suave y fluido. Finalmente, la estabilidad durante toda la cirugía también utiliza estos algoritmos de aprendizaje profundo para detectar cualquier cambio o variabilidad en el sistema de tal manera que si se detecta que el robot empieza a moverse de forma errática se corrija evitando movimientos no deseados que puedan dañar al paciente o alterara la cirugía⁵. El dispositivo STAR (Smart Tissue Autonomous Robot) utiliza algoritmos de aprendizaje por refuerzo que son algoritmos de aprendizaje automático que, a raíz de repetir tareas como la de la sutura, mejoran la precisión de sus movimientos. Funciona según un sistema de recompensas, ya sea positiva o de penalización, y en función de ésta el robot ajusta sus movimientos autónomos y se usa para realizar suturas con una mayor precisión que una sutura manual⁶.



Un aspecto crucial de la estabilidad de los sistemas robóticos en cirugía es la integración de realimentación háptica, que permite a los cirujanos recibir señales táctiles a través de la interfaz robótica. Esta es una diferencia muy importante entre la cirugía abierta y la robótica, donde el cirujano no es capaz de palpar las estructuras anatómicas, un campo en constante desarrollo. Las generaciones más recientes de robots muestran en sus pantallas información sobre fuerzas, pero a los cirujanos les cuesta entender cómo trasladar esos valores que se dan con respecto a las sensaciones táctiles que ellos tendrían. Actualmente se están desarrollando investigaciones con diferentes sensores para poder proporcionar una información más clara a los cirujanos⁷.

3.1.3. Monitorización en tiempo real

La integración de IA con sistemas de monitorización permite a los robots evaluar constantemente las condiciones del paciente y realizar ajustes en tiempo real. Esta capacidad es crucial en procedimientos de

alta precisión como la neurocirugía. Los robots que realizan cirugía mínimamente invasiva, como el sistema da Vinci, pueden integrar algoritmos de IA para mejorar la precisión durante la intervención.

Algoritmos de “Machine Learning” (ML) como los denominados “Support Vector Machine” (SVM) o “Random Forest” (RF) pueden analizar señales fisiológicas (presión arterial, ritmo cardíaco, saturación de oxígeno, etc.) y patrones de comportamiento del robot para anticipar complicaciones y realizar ajustes en tiempo real durante la cirugía. Esto permite a los robots ajustar automáticamente los parámetros del procedimiento, como la velocidad del movimiento del brazo robótico, para mejorar la seguridad del paciente. Además, En procedimientos quirúrgicos complejos, como los de corazón abierto, los sistemas de IA pueden analizar los datos de electrocardiogramas (ECG) y otros monitores cardiovasculares.

Algoritmos de “Redes Neuronales Recurrentes” (RNN) o “Long Short-Term Memory” (LSTM) pueden identificar patrones de variabilidad en el ritmo cardíaco, lo que podría indicar problemas como arritmias o una disminución en el flujo sanguíneo. Esto permite que los cirujanos y el sistema robótico ajusten la intervención antes de que la situación se convierta en una complicación grave^{8,9}.

3.1.4. Asistencia con realidad aumentada

La combinación de IA y realidad aumentada (RA) ofrece a los cirujanos una visión mejorada del área de intervención, superponiendo información en tiempo real, como estructuras internas del paciente o rutas óptimas para realizar incisiones. En la actualidad, se utilizan las siguientes técnicas de IA¹⁰:

- 01 Algoritmos de Aprendizaje Profundo (DL):
 - › “Redes Neuronales Convolucionales” (CNN)¹¹: Utilizadas para el reconocimiento y segmentación de imágenes médicas, permitiendo la identificación precisa de estructuras anatómicas sin necesidad de marcadores físicos. Estas redes procesan datos visuales complejos y facilitan la superposición precisa de modelos virtuales en el entorno real.
 - › “You Only Look Once” (YOLO)¹²: Este algoritmo de detección en tiempo real se emplea para identificar y localizar instrumentos quirúrgicos



y características anatómicas durante la cirugía, mejorando la navegación y reduciendo el riesgo de colisiones.

- 02 Algoritmos de Detección y Prevención de Colisiones:
- › “Long Short-Term Memory” (LSTM)¹³: Estas redes neuronales recurrentes se aplican para predecir movimientos futuros de herramientas y órganos, permitiendo la detección temprana de posibles colisiones y ajustando las trayectorias en consecuencia.
- 03 Sistemas de Realimentación Háptica:
- › Modelos Basados en Aprendizaje Automático: Integran datos sensoriales para proporcionar retroalimentación táctil en sistemas de realidad aumentada, mejorando la percepción del cirujano sobre la resistencia y textura de los tejidos durante procedimientos robóticos.

Robots como el ROSA¹⁴, usado en neurocirugía y ortopedia, usa la RA integrando imágenes de escáner para guiar al cirujano y usa algoritmos de planificación. También el robot Stryker Mako que se usa en cirugía ortopédica, proyecta la planificación quirúrgica sobre el hueso del paciente y lo hace usando modelos predictivos con aprendizaje automático, lo que permite ajustar el plan quirúrgico en función de la anatomía del paciente.

3.2. Aplicaciones de la IA en robots de neurorrehabilitación

La incorporación de IA en neurorrehabilitación robótica está revolucionando los enfoques terapéuticos para pacientes con lesiones neurológicas. Gracias a algoritmos de aprendizaje automático, los robots pueden evaluar, adaptar y optimizar los tratamientos de forma personalizada y en tiempo real. Esta combinación permite no solo una mejor recuperación motora, sino también una mayor precisión diagnóstica y control del progreso terapéutico. Tecnologías como las redes neuronales, el control adaptativo y los modelos predictivos están permitiendo que los dispositivos robóticos se ajusten dinámicamente a las capacidades de cada paciente. Asimismo, las interfaces cerebro-computadora abren nuevas posibilidades de control mediante señales cerebrales, potenciando la autonomía del paciente. Esta integración inteligente representa un avance clave hacia terapias más efectivas, interactivas y centradas en la persona.

3.2.1. Evaluación y diagnóstico

Los robots impulsados por IA pueden analizar los movimientos de los pacientes con trastornos neurológicos, como las lesiones medulares, los accidentes cerebrovasculares (ACV), la enfermedad de Parkinson, entre otros, que afectan el control motor y la coordinación de los movimientos del paciente, y generar informes detallados sobre su estado y evolución. Estos sistemas permiten diagnósticos más precisos y planes de rehabilitación personalizados puesto que utilizan sensores y algoritmos de IA para evaluar con precisión la movilidad de los pacientes durante las sesiones de rehabilitación. Gracias a estos análisis detallados y personalizados, los pacientes pueden recibir tratamientos más efectivos, ajustados a sus necesidades y capacidades individuales^{15,16}.

Por ejemplo, robots como Lokomat y Ekso Bionics utilizan IA para evaluar la movilidad de pacientes con lesiones en la médula espinal y adaptar sus sesiones de rehabilitación de manera dinámica. Esto mejora la efectividad de la terapia y acelera el proceso de recuperación. Los algoritmos que utilizan son, por un lado, “Redes Neuronales Artificiales” (ANNs) para predecir y clasificar patrones de movimiento en pacientes. De esta manera, los algoritmos permiten al robot aprender y reconocer patrones de movimiento anómalos. En consecuencia, el robot puede adaptar la intensidad y frecuencia de las sesiones de rehabilitación en función de las capacidades y limitaciones de cada paciente. Por otro lado, utilizan redes CNNs para evaluar imágenes o datos visuales. En dispositivos como Lokomat y Ekso Bionics, las imágenes del cuerpo del paciente se pueden analizar usando estas redes neuronales para comprender cómo se puede tratar al paciente. De esta manera se puede ajustar dinámicamente el robot para alinear mejor las extremidades o ajustar la postura del dispositivo. También se utilizan, por ejemplo, “Support Vector Machine” (SVM) para determinar si el paciente tiene un patrón de movimiento que se asemeja más a la función motriz normal o si necesita un enfoque terapéutico diferente.

3.2.2. Control del robot

El control del movimiento de dispositivos robóticos de neurorrehabilitación requiere un enfoque centrado en la optimización del rendimiento y la adaptabilidad de los sistemas. Estos enfoques son especialmente úti-

les para mejorar la precisión, flexibilidad y adaptación del robot a las condiciones variables de los pacientes durante la rehabilitación.

A continuación, se presentan algunos algoritmos y técnicas de control que combinan IA para el control motor en dispositivos robóticos de neurorrehabilitación¹⁷⁻¹⁹:

- **Control Adaptativo Basado en IA:**

El control adaptativo es una técnica que ajusta los parámetros de un controlador en tiempo real para mantener el rendimiento deseado de un sistema en presencia de incertidumbres. En un robot de neurorrehabilitación, el control adaptativo se puede combinar con IA para aprender y ajustar dinámicamente las políticas de control basadas en la variabilidad del paciente. Se utilizan “Redes Neuronales Recurrentes” (RNN) para modelar la dinámica de los movimientos del paciente y así poder generar un controlador adaptativo que ajuste las fuerzas del robot durante la rehabilitación. Se utiliza un controlador adaptativo, como un controlador de modelo de referencia (MRAC) o controlador adaptativo predictivo (APC).

- **Control Predictivo Basado en Modelos con IA:**

El Control Predictivo Basado en Modelos (MPC) es una técnica avanzada que utiliza modelos matemáticos del sistema para predecir el comportamiento futuro y optimizar las decisiones de control. Este enfoque puede ser mejorado mediante IA para modelar de manera más precisa las dinámicas del paciente y del robot. Utiliza un modelo dinámico que representa la cinemática y dinámica del robot y el MPC predice la evolución para optimizar trayectorias en tiempo real para que el movimiento sea seguro y eficiente durante la rehabilitación.

- **Control No Lineal con IA:**

Los sistemas robóticos de neurorrehabilitación pueden tener comportamientos no lineales debido a las características del robot y las interacciones con el paciente. Los controladores no lineales son cruciales para manejar estas interacciones y pueden beneficiarse del uso de IA puesto que esta aporta algoritmos para poder optimizar, modelar, predecir y controlar sistemas complejos. Estos algoritmos tienen en cuenta las condiciones cambiantes en tiempo real lo que permite con métodos de optimización, ajustar parámetros de control para hacer frente a esas no linealidades.

Algunos ejemplos de robots que utilizan estos sistemas de control son ReWalk o el EksoGT, exoesqueletos que aplican algoritmos de IA para que el robot ajuste sus movimientos de acuerdo con el progreso del paciente. El exoesqueleto ReWalk se utiliza para permitir que los pacientes con parálisis de miembro inferior puedan caminar. Utiliza un control basado en algoritmos de control adaptativos e inteligentes, lo que permite que el sistema se ajuste al usuario y su entorno. Utiliza técnicas de control no lineal puesto que los movimientos del ReWalk son complejos debido a la interacción entre el cuerpo humano y el exoesqueleto. Además, para manejar estas interacciones, ReWalk emplea algoritmos que pueden adaptar las respuestas de los motores en función de los movimientos no lineales de los usuarios. Esto es crucial para ajustar la dinámica del robot a los cambios en la marcha de los usuarios, que pueden variar en función de su condición física y los distintos niveles de parálisis. También utiliza técnicas de control predictivo basado en modelos, incorporando un modelo predictivo que evalúa la postura y los movimientos del usuario antes de que se realicen. Este modelo predice la trayectoria del cuerpo y ajusta los movimientos del robot en tiempo real para garantizar que el usuario mantenga una marcha natural. Los modelos predictivos se ajustan en función del análisis de las señales provenientes de los sensores integrados que miden la postura del usuario. Finalmente, tiene en cuenta técnicas de control adaptativo utilizando algoritmos de aprendizaje automático y adaptativos. A medida que el paciente usa el dispositivo, los algoritmos se ajustan de forma continua, lo que permite una mejora en el control de la marcha con el tiempo. Estos algoritmos aprenden de la interacción entre el usuario y el exoesqueleto, adaptándose a sus necesidades específicas para hacer los movimientos más suaves y naturales.

Además, se están desarrollando interfaces cerebro-computadora (BCI) que permiten a los pacientes controlar dispositivos robóticos con el pensamiento, lo que representa un avance significativo en la rehabilitación neurológica. La IA es crucial en varios aspectos de las BCI y su integración con los dispositivos robóticos. Estos son algunos de los roles clave que la IA desempeña²⁰:

- **Procesamiento de señales cerebrales:**

Las BCI recogen señales cerebrales a través de diversos métodos, como electroencefalogramas (EEG), electrocorticografías (ECoG) o implantes neurona-

les. Estas señales son extremadamente complejas y ruidosas, y la IA juega un papel crucial al filtrar y procesar estas señales para extraer información significativa. Los algoritmos de IA, especialmente los algoritmos de aprendizaje profundo (DL), se utilizan para identificar patrones en las señales cerebrales y convertirlos en comandos que un robot o dispositivo robótico puede entender y ejecutar.

- **Decodificación de intenciones motoras:**

Interpreta las señales cerebrales para comprender qué está tratando de hacer el paciente, por ejemplo, mover una parte del cuerpo. Estos sistemas de decodificación, impulsados por algoritmos SVMs o RNNs, pueden diferenciar entre diferentes tipos de intencionalidad cerebral y generar un control de movimiento adecuado para el dispositivo robótico.

- **Interacción en tiempo real:**

Una de las principales ventajas de las interfaces BCI impulsadas por IA es su capacidad de actuar en tiempo real. Los algoritmos de predicción y control adaptativo permiten que el sistema responda rápidamente a las señales cerebrales, de modo que el paciente pueda controlar el dispositivo robótico en tiempo real. Esto es esencial en aplicaciones como la rehabilitación, donde se requiere que el robot o el exoesqueleto responda de manera fluida y sin demoras a las señales del cerebro.

- **Mejora continua y adaptación:**

Gracias a la capacidad de aprendizaje automático, a medida que un paciente interactúa más con el dispositivo robótico, los algoritmos de aprendizaje profundo (DL) pueden adaptarse y optimizar la forma en que el dispositivo responde a las señales cerebrales. Esta realimentación continua es crucial para maximizar la efectividad de la rehabilitación, ya que permite que el robot ajuste de manera autónoma su comportamiento según el progreso del paciente.

Un ejemplo es el dispositivo EksoGT que permite incorporar las señales cerebrales y las traduce en movimientos específicos del robot permitiendo que el paciente control el exoesqueleto de manera precisa.

3.2.3. Monitorización y predicción de recuperación

La IA no solo ajusta los tratamientos en tiempo real, sino que también puede predecir la recuperación de un

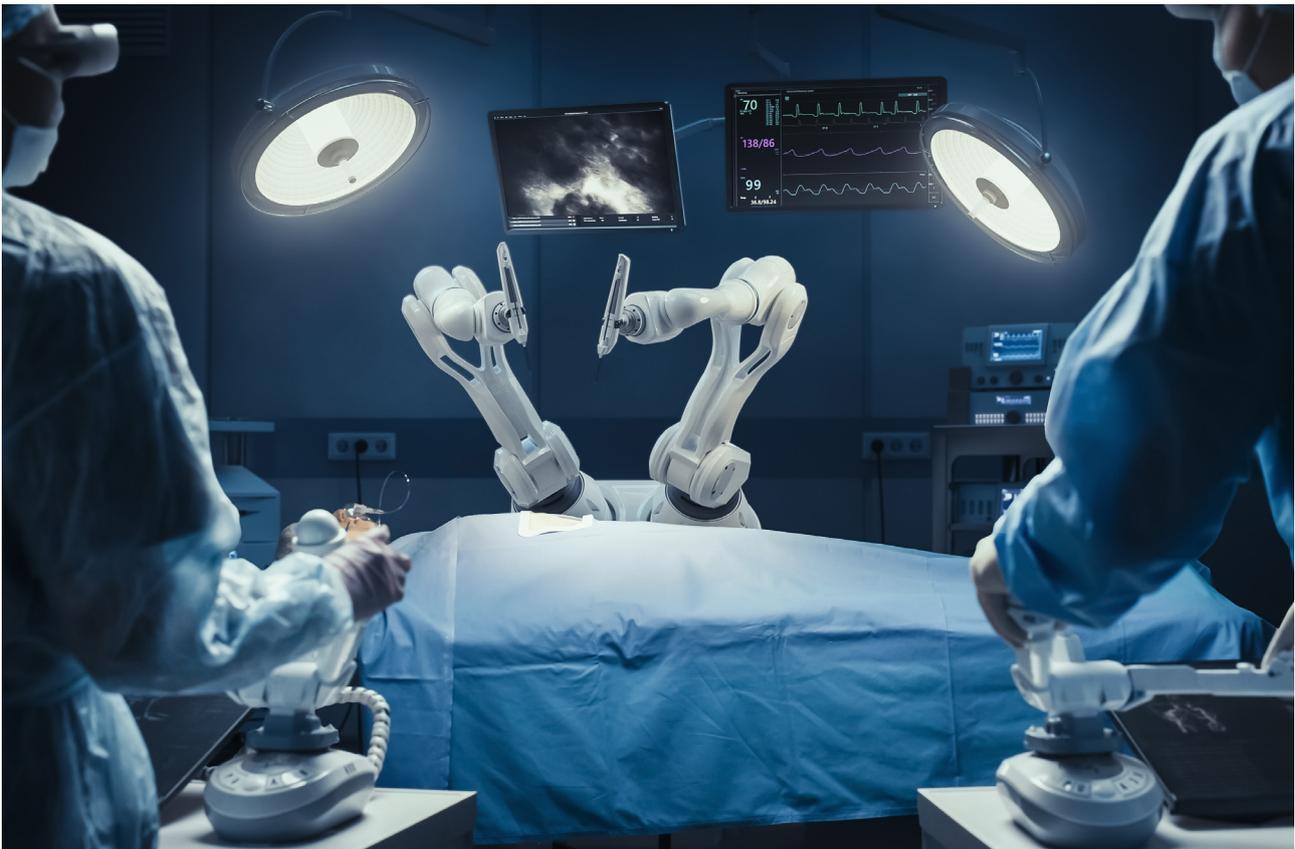
paciente, lo cual es esencial para optimizar los planes de rehabilitación. Los sistemas pueden analizar los datos históricos de los pacientes, como su capacidad de movimiento, ritmo de recuperación y respuesta a los ejercicios para prever cómo evolucionará su condición. Los dispositivos como ReWalk y EksoGT, utilizados para rehabilitación de pacientes con lesiones medulares, emplean redes neuronales profundas para analizar datos de movimiento y prever el progreso del paciente. Con esta información, los sistemas pueden predecir el nivel de recuperación de la función motora y ajustar la terapia de acuerdo con las expectativas de evolución del paciente. Además, algoritmos como los árboles de decisión y “Random Forest” se utilizan para predecir la respuesta de los pacientes a diferentes intervenciones terapéuticas. Los datos de las sesiones previas tales como el tipo de movimientos realizados, la fatiga del paciente y la intensidad del ejercicio se analizan para identificar patrones y predecir qué tipo de ejercicios podrían ser más efectivos para el paciente en función de su historial de rehabilitación²¹.

Además, los sistemas de predicción basados en IA pueden alertar a los médicos sobre posibles recaídas y recomendar cambios en el tratamiento antes de que el paciente experimente un deterioro significativo²².

3.3. Desafíos y oportunidades para la IA en la robótica médica

Con respecto al nivel de autonomía de los robots quirúrgicos, todavía queda mucho camino que recorrer hasta el nivel 5 de autonomía total y está claro que la IA apoya este desarrollo tecnológico hacia una mayor autonomía. Lo que ya es una realidad es que la IA permite que cada vez se estén planteando tareas más automatizadas en los quirófanos como suturas, identificación de tejidos, propuestas de planos de disección o cómo minimizar los márgenes residuales en cirugías oncológicas; gracias a los dispositivos robóticos. Adicionalmente se abre un debate sobre la responsabilidad frente a las decisiones y acciones tomadas por un dispositivo que de forma autónoma basados en la IA y las del cirujano encargado de la intervención. Por lo que queda un camino que recorrer con respecto a las precisiones y sesgos de los algoritmos que se usan en los dispositivos y sobre la ética y regulación en este sentido.

Adicionalmente, los sistemas de IA no solo podrán monitorizar y ajustar las condiciones durante una



cirugía, sino que también podrían sugerir opciones de tratamiento en función de los datos recopilados. Usando algoritmos de IA como RF, “Deep Neural Networks” (DNN) y “Decision Trees”, los sistemas podrían analizar las características del paciente y las condiciones quirúrgicas para predecir qué enfoque quirúrgico es más adecuado, minimizando el riesgo y mejorando los resultados²³.

Con respecto a la integración de la RA en sistemas quirúrgicos robóticos y autónomos, se necesita seguir mejorando en algoritmos que ayuden a posicionar de forma más precisa las herramientas quirúrgicas, sobre todo en cirugías complejas. Esto apoyará a un mejor desarrollo de las cirugías, así como a los propios cirujanos. Por lo tanto, se tiene que continuar trabajando en los algoritmos de optimización actuales que tienen algunas limitaciones para detectar colisiones internas. Esto es realmente importante para evitar daños en tejidos durante la cirugía. Como se ha mencionado anteriormente, una diferencia importante es la pérdida de palpar los tejidos directamente con las manos al estar en una cirugía robótica por lo que es clave también la inclusión de percepción háptica durante la utilización de estos dispositivos de RA para el futuro.

A pesar de los grandes avances logrados por la IA en los sistemas robotizados en neurorrehabilitación, existen diversas áreas en las que todavía se necesita mejorar la capacidad de los algoritmos utilizados para adaptarse a cambios en el progreso de los pacientes en tiempo real. Los sistemas de IA deben ser más sensibles a los pequeños cambios en el patrón de movimiento o en la condición física del paciente para ajustar de manera más precisa las configuraciones del robot como la velocidad, fuerza y rango de movimiento. Además, se deberían incluir más datos de los que se incluyen actualmente para poder proporcionar una rehabilitación neurológica holística como el dolor, la fatiga u otros aspectos cognitivos que no siempre se capturan con los sistemas actuales. Se requiere, por lo tanto, incluir datos fisiológicos como la frecuencia cardíaca o la actividad electrodérmica, entre otras, lo que podría ayudar a generar una evaluación más precisa de la condición del paciente y mejorar las decisiones de rehabilitación. Además, con respecto a la precisión de la predicción de recuperación quedan grandes retos que abordar, porque los modelos actuales no siempre están especializados para adaptarse a las características únicas de estos pacientes.

3.4. Referencias

- **1.** Attanasio, A., Scaglioni, B., Momi, E. D., Fiorini, P. & Valdastri, P. Autonomy in Surgical Robotics. *Annu. Rev. Control, Robot., Autonomous Syst.* 4, 651–679 (2021). doi: 10.1146/annurev-control-062420-090543.
- **2.** Lee A, Baker TS, Bederson JB, Rapoport BI. Levels of autonomy in FDA-cleared surgical robots: a systematic review. *npj Digit Med.* 2024;7(1):103. doi:10.1038/s41746-024-01102-y.
- **3.** Samalavicius NE, Janusonis V, Siaulyš R, Jasenas M, Deduchovas O, Venckus R, et al. Robotic surgery using Senhance® robotic platform: single center experience with first 100 cases. *J Robot Surg.* 2020 Apr;14(2):371–6. doi: 10.1007/s11701-019-01000-6.
- **4.** Wen JX, Yu NZ, Long X, Wang XJ. Robotic surgical systems in plastic and reconstructive surgery. *Chin Med J* 2024; 137:1366–1368. doi: 10.1097/CM9.0000000000002811.
- **5.** Hussain MD, Rahman MH, Ali NM. Artificial intelligence and machine learning enhance robot decision-making adaptability and learning capabilities across various domains. *Int J Sci Eng.* 2024 Jun 3;1(3):161. doi: 10.62304/ijse.v1i3.161.
- **6.** Ostrander BT, Massillon D, Meller L, Chiu ZY, Yip M, Orosco RK. The current state of autonomous suturing: a systematic review. *Surg Endosc.* 2024 Mar 29. doi: 10.1007/s00464-024-09814-0.
- **7.** Knudsen JE, Ghaffar U, Ma R, Hung AJ. Clinical applications of artificial intelligence in robotic surgery. *J Robotic Surg.* 2024 Mar;18(1):102. doi: 10.1007/s11701-024-01867-0.
- **8.** Acharya UR, Oh SL, Hagiwara Y, Tan JH, Adam M, Ang PN. Deep Learning for Arrhythmia Detection: A Review. *Comput Biol Med.* 2020;134:103394. doi: 10.1016/j.compbio-med.2020.103394.
- **9.** Gulsin GS, Narayan SM, Hegde SM, et al. Artificial Intelligence in Cardiovascular Disease: From Concept to Practice. *Am J Cardiol.* 2019;123(10):1545–1551. doi: 10.1016/j.amjcard.2019.01.038. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6679252/>
- **10.** Seetohul J, Shafiee M, Sirlantzis K. Augmented Reality (AR) for Surgical Robotic and Autonomous Systems: State of the Art, Challenges, and Solutions. *Sensors.* 2023;23(13):6202. doi:10.3390/s23136202.
- **11.** Cortes, D., Bermejo, B., Juiz, C. The use of CNNs in VR/AR/MR/XR: a systematic literature review. *Virtual Reality* 28, 154 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10055-024-01044-6>.
- **12.** Pan X, Bi M, Wang H, Ma C, He X. DBH-YOLO: a surgical instrument detection method based on feature separation in laparoscopic surgery. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2024 Nov;19(11):2215–2225. doi: 10.1007/s11548-024-03115-0.
- **13.** Tamer Abdalbaki Alshirbaji,, Jalal, Nour Aldeen and Möller, Knut. “A convolutional neural network with a two-stage LSTM model for tool presence detection in laparoscopic videos” *Current Directions in Biomedical Engineering*, vol. 6, no. 1, 2020, pp. 20200002. <https://doi.org/10.1515/cdbme-2020-0002>.
- **14.** Pruitt R, Goldstein TA, Rodgers S. Using the ROSA Robot for Lesion Resection: A Novel Adapter With Added Applications. *Oper Neurosurg (Hagerstown).* 2022 Aug 1;23(2):148–153. doi: 10.1227/ons.0000000000000277.
- **15.** Lee MH, Siewiorek DP, Smailagic A, Bernardino A, Bermúdez i Badia S. Design, development, and evaluation of an interactive personalized social robot to monitor and coach post-stroke rehabilitation exercises. *User modeling and user-adapted interaction.* 2023;(33):545–569. doi: <https://doi.org/10.1007/s11257-022-09348-5>.
- **16.** Lee MH, Siewiorek DP, Smailagic A, Bernardino A, Bermúdez i Badia S. Opportunities of a Machine Learning-based Decision Support System for Stroke Rehabilitation Assessment. 2020; arXiv2002.12261. doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.12261>.
- **17.** Mashud GA, Hasan SK, Alam N. Advances in Control Techniques for Rehabilitation Exoskeleton Robots: A Systematic Review. *Actuators.* 2025;14(3):108. doi:10.3390/act14030108.
- **18.** Yang T, Gao X. Adaptive Neural Sliding-Mode Controller for Alternative Control Strategies in Lower Limb Rehabilitation. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng.* 2020 Jan;28(1):238–247. doi: 10.1109/TNSRE.2019.2946407.
- **19.** Kaplanoglu E, Akgun G. Data-Driven Predictive Control of Exoskeleton for Hand Rehabilitation with Subspace Identification. *Sensors.* 2022;22(19):7645. doi:10.3390/s22197645.
- **20.** Camargo-Vargas D, Callejas-Cuervo M, Mazzoleni S. Brain-Computer Interfaces Systems for Upper and Lower Limb Rehabilitation: A Systematic Review. *Sensors.* 2021;21(13):4312. doi: 10.3390/s21134312.
- **21.** Zhang X, Rong X, Luo H. Optimizing lower limb rehabilitation: the intersection of machine learning and rehabilitative robotics. *Front Rehabil Sci.* 2024;5:1246773. doi:10.3389/fresc.2024.1246773.
- **22.** Maki S, Furuya T, Inoue T, Yunde A, Miura M, Shiratani Y, Nagashima Y, Maruyama J, Shiga Y, Inage K, Eguchi Y, Orita S, Ohtori S. Machine learning web application for predicting functional outcomes in patients with traumatic spinal cord injury following inpatient rehabilitation. *J Neurosurg Spine.* 2020;32(1):70–76. doi:10.3171/2019.9.JNS19217.
- **23.** Kwon JM, Lee YS, Choi YJ, Kim YJ, Park YH, Lee HW. Artificial Intelligence and Surgical Decision-Making. *Ann Surg Treat Res.* 2021;100(3):116–123. doi:10.4174/astr.2021.100.3.116.



4. INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA SALUD MÓVIL Y MEDICINA PERSONALIZADA

El avance de las tecnologías móviles ha impulsado el desarrollo e integración en la práctica clínica de aplicaciones de salud móvil o mhealth que, combinadas con dispositivos médicos y/o sensores, ayudan a monitorizar a distancia variables fisiológicas (entre otras, glucosa en sangre, ritmo cardíaco, síntomas, etc.) y de estilo de vida, mejoran la toma de decisiones relacionada con enfermedades o contribuyen a prevenir enfermedades. Desde hace unos años, es cada vez más frecuente que estas aplicaciones integren algoritmos de IA para detectar patrones, predecir riesgos y/o proporcionar alertas o recomendaciones automáticas en los periodos entre visitas presenciales. Las áreas principales de aplicación de estas tecnologías se centran en: 1) las patologías crónicas de alta prevalencia como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares o el cáncer; 2) la promoción de la salud, el autocuidado y el envejecimiento activo y saludable; 3) la medicina personalizada y el fenotipado digital; y 4) los asistentes virtuales y agentes conversacionales o chatbots.

4.1. Aplicaciones de la IA en salud móvil para el seguimiento remoto de pacientes con enfermedades crónicas

En enfermedades crónicas complejas, como es el caso de la diabetes mellitus, que requiere un control diario intensivo, los algoritmos de IA pueden aportar un gran valor. Los pacientes toman numerosas decisiones en su día a día sobre la insulina a administrar, la dieta o la actividad física, y las aplicaciones inteligentes de salud móvil buscan simplificar estas tareas **prediciendo los niveles de glucosa** y guiando el tratamiento¹. Existe una amplia oferta de aplicaciones *mhealth*, que integra el registro de datos de monitorización, la comunicación con un profesional clínico, el uso de recordatorios para mejorar la adherencia al tratamiento y algún tipo de educación o formación médica². En diabetes tipo 1, el tipo de diabetes insulino dependiente que requiere la administración diaria de insulina, las tecnologías para la diabetes representan un cambio de paradigma en la gestión de la enfermedad^{3,4}. Los sistemas de ayuda a la decisión soportados por algoritmos automáticos pueden anticipar los riesgos para el paciente y generar recomendaciones personalizadas^{5,6}. Estos sistemas pueden enriquecerse con algoritmos de predicción de glucosa continua, que utilizan técnicas avanzadas de aprendizaje profundo para analizar

las medidas de glucosa del paciente y anticipar eventos adversos a corto plazo, contribuyendo a mejorar el control glucémico del paciente⁷⁻¹⁰.

Las tecnologías de administración automática de insulina o páncreas artificial se han implantado en la práctica clínica en los últimos cinco años¹¹⁻¹³. Si bien el páncreas artificial ha tenido un impacto positivo en el control de la diabetes tipo 1, estos sistemas requieren la intervención del paciente en determinados momentos del día, como ante la ingesta de alimento o la práctica de actividad física, por lo que aún existe margen de mejora^{14,15}. Los algoritmos de IA, integrados en herramientas de ayuda a la decisión pueden recomendar ajustes en las dosis de insulina y proporcionar un control tan efectivo y seguro como el del profesional médico^{16,17}. En el futuro, los sistemas de páncreas artificial podrían beneficiarse de un algoritmo de control totalmente automatizado que utilice IA para detectar cuándo se ingiere alimento y administrar insulina prandial una vez detectado¹⁴.

En el ámbito de la enfermedad cardiovascular, una de las principales causas de morbilidad y mortalidad en el mundo¹⁸, la telemonitorización apoyada por algoritmos de IA está revolucionando la detección temprana de arritmias y la gestión de la insuficiencia cardíaca. La integración de las aplicaciones *mhealth* con dispositivos médicos y wearables proporcionan datos continuos de ritmo cardíaco, electrocardiograma (ECG), presión arterial, peso, etc., que los algoritmos de IA pueden analizar para identificar situaciones anómalas. Los pacientes pueden estar monitorizados las 24 horas gracias al análisis continuo de las señales cardíacas, permitiendo mejorar su comodidad y seguridad y facilitar intervenciones tempranas ante cualquier descompensación¹⁹. Las funcionalidades que ofrecen estas soluciones permiten alertar al médico o al paciente con antelación, facilitando intervenciones de forma proactiva (ajuste de medicación, recomendación de realizar una visita clínica, etc.), y evitando complicaciones como hospitalizaciones. Los programas de telemonitorización de insuficiencia cardíaca con dispositivos de monitorización invasiva y no invasiva, han demostrado reducir la mortalidad y las hospitalizaciones asociadas²⁰. Por otro lado, los programas de rehabilitación cardíaca remota también se apoyan en algoritmos que predicen riesgos a partir de variables de monitorización como el ejercicio y las constantes vitales, y adaptan el plan de seguimiento en función de los progresos del paciente^{21,22}.



Los sistemas de salud móvil conectados con dispositivos inteligentes que permiten a los usuarios registrar por sí mismos el ECG se han vuelto muy populares. El reloj inteligente de Apple (Apple Watch™) incorpora sensores de pulso y ECG de una derivación, junto con algoritmos avanzados capaces de detectar fibrilación auricular (FA). Su sistema de IA analiza las irregularidades en la señal para notificar al usuario posibles episodios de FA incluso si son asintomáticos. La funcionalidad de ECG del Apple Watch ha demostrado una alta sensibilidad y especificidad en la identificación de FA frente a ECG clínicos de referencia²³. KardiaMobile 6^{L24} es el primer ECG personal de seis derivaciones con marcado CE conectado a una aplicación móvil. Su algoritmo de análisis automático detecta fibrilación auricular, bradicardia y taquicardia. Por otro lado, la aplicación médica de FibriCheck²⁵ usa la cámara del móvil para medir el pulso (por medio de fotopleletismografía) y detectar FA y otras alteraciones del ritmo cardiaco sin hardware adicional. La aplicación analiza en tiempo real las variaciones en la onda de pulso, ofreciendo un informe inmediato en el smartphone. Cuenta con certificación CE y de la FDA y se ha integrado en programas de salud pública (en Reino Unido y Bélgica) para realizar un cribado poblacional de FA. La eficacia de este sistema ha sido probada en más de 50 estudios clínicos, demostrando que los algoritmos de IA pueden lograr precisión diagnóstica equiparable a dispositivos tradicionales^{26,27}.

En oncología, el seguimiento remoto se centra tanto en la detección temprana de recurrencias y complicaciones como el acompañamiento del paciente durante tratamientos prolongados²⁸. La aplicación de algoritmos de IA en este contexto permite la monitorización continua de síntomas y la personalización de intervenciones terapéuticas a distancia. En el Servicio de Oncología radioterápica del Hospital Ramón y Cajal, se ha desarrollado la aplicación móvil DolorXcape diseñada para el seguimiento del dolor oncológico. La herramienta incorpora un algoritmo de predicción capaz de identificar patrones de dolor, generando alertas clínicas que facilitan intervenciones tempranas y ajustes de la terapia, con el objetivo de optimizar el manejo del dolor y mejorar la calidad de vida del paciente²⁹.

En este ámbito, se han desarrollado múltiples aplicaciones móviles orientadas a la detección precoz de cáncer de piel mediante el análisis automatizado de imágenes de lesiones dermatológicas capturadas por el propio usuario. Estas soluciones, basadas en mode-

los de aprendizaje profundo, permiten evaluar el riesgo de malignidad en tiempo real^{30,31}. Su implementación ha incrementado la tasa de detección de lesiones (pre) malignas, pero a cambio estas herramientas suponen un aumento en las consultas médicas y en los costes sanitarios asociados³¹. Además, diversos estudios advierten sobre la variabilidad en la precisión diagnóstica de estos sistemas y el potencial riesgo de falsos negativos, por lo que deben usarse con cautela y de forma complementaria al juicio clínico especializado³².

El seguimiento remoto de pacientes está transformando la gestión de las enfermedades crónicas y la vigilancia de la salud entre visitas médicas, mostrando una alta aceptación y usabilidad en la atención remota de condiciones médicas estables, facilitando un seguimiento más personalizado y eficiente de los pacientes³³. Gracias a las aplicaciones móviles y los dispositivos conectados, es posible recopilar datos relevantes en tiempo real desde el domicilio del paciente, que pueden ser analizados por algoritmos de IA para detectar eventos clínicos anómalos o cambios en el estado de salud, permitiendo una atención más proactiva y personalizada. Los pacientes con patologías crónicas requieren controles frecuentes para ajustar el tratamiento y evitar descompensaciones. La monitorización continua de variables fisiológicas ofrece nuevas fuentes de información, que combinadas con algoritmos de IA está contribuyendo a mejorar la detección precoz de eventos de riesgo.

Un ejemplo notable se da en insuficiencia cardiaca, donde un algoritmo de IA combinado con una aplicación de *mhealth* permite detectar la sobrecarga de líquido pulmonar por medio del análisis del habla³⁴. Como ya se ha mencionado, los relojes inteligentes y los monitores portátiles junto con algoritmos de IA han democratizado la detección de arritmias como la FA. La monitorización remota también abarca el envío de imágenes o vídeos por parte del paciente y su análisis automatizado, como en el caso de las aplicaciones para detección precoz del cáncer de piel. En cuanto a voz y sonido, se están aplicando algoritmos de IA en estudios piloto en EPOC y asma donde la grabación de la tos y la respiración con el móvil, analizada por IA, permite detectar exacerbaciones respiratorias^{35,36}. En patologías neurológicas como esclerosis múltiple o Parkinson, los sensores del móvil han demostrado utilidad en la detección de alteraciones en la marcha o el equilibrio, anticipando el deterioro clínico antes de la visita médica^{37,38}.

Tras una cirugía o alta hospitalaria, el seguimiento remoto puede prevenir complicaciones. Existen programas de hospitalización domiciliar que equipan al paciente con dispositivos sencillos (termómetro, pulsioxímetro, báscula) conectados a una aplicación que guía mediciones diarias. Los algoritmos de IA integrados analizan los datos para identificar señales de alarma —como fiebre persistente o bajada de la saturación— y activar alertas para el profesional médico ante posibles complicaciones postquirúrgicas (infecciones, tromboembolismo)³⁹.

Las aplicaciones móviles que integran algoritmos de IA representan herramientas de alto potencial en la gestión de enfermedades crónicas, al posibilitar la monitorización continua, el análisis avanzado de datos clínicos y la generación de respuestas personalizadas. Cuando estas soluciones se integran adecuadamente —con validación clínica, interoperabilidad con la historia clínica electrónica y supervisión remota por parte del profesional sanitario—, pueden mejorar la adherencia al tratamiento, anticipar eventos adversos y optimizar la atención personalizada, situando al paciente en el centro del proceso asistencial. La monitorización remota basada en IA amplía el alcance de la atención sanitaria más allá de las consultas presenciales, haciendo posible una vigilancia continua y adaptada a las necesidades individuales. Este enfoque favorece intervenciones rápidas y la detección temprana de complicaciones, y promueve un modelo de atención más preventivo incluso en fases avanzadas de la enfermedad. Para los pacientes, supone una atención invisible pero presente: se sienten acompañados en su vida diaria sabiendo que serán contactados si se detecta cualquier anomalía importante.

4.2. Aplicaciones de la IA en salud móvil para autocuidado, promoción de la salud y envejecimiento saludable

En el ámbito del autocuidado, la promoción de la salud y el envejecimiento saludable, las aplicaciones de salud móvil representan herramientas clave para empoderar a los usuarios en la gestión proactiva de su salud. Estas soluciones digitales facilitan acceder a asesoramiento personalizado, recordatorios sobre hábitos saludables, seguimiento continuo de síntomas y análisis preventivos, sin requerir supervisión médica constante⁴⁰⁻⁴². Mediante la integración de algoritmos de apren-

dizaje automático y procesamiento del lenguaje natural (NLP), son capaces de identificar patrones de comportamiento, mejorar la adherencia a rutinas saludables y promover estilos de vida activos.

Las aplicaciones basadas en IA para el autocuidado integran funcionalidades avanzadas como el registro continuo de variables relacionadas con el estilo de vida (actividad física, sueño, alimentación) mediante dispositivos de tipo wearable⁴⁰, la evaluación de síntomas mediante chatbots⁴³, y programas de entrenamiento interactivo orientados al fomento de conductas saludables. Estas herramientas, pueden apoyarse en modelos predictivos que permiten anticipar riesgos y facilitar intervenciones personalizadas, reforzando la capacidad del individuo para autogestionar su salud.

Las aplicaciones centradas en el envejecimiento saludable fomentan la autonomía y actúan como herramientas preventivas frente al deterioro físico y cognitivo. Una revisión reciente ha identificado los objetivos de salud principales de estas aplicaciones, entre los que se encuentran la movilidad, la salud mental, la nutrición, la cognición y el estilo de vida saludable⁴⁴. Las intervenciones basadas en algoritmos de IA han demostrado ser eficaces para fomentar el envejecimiento saludable, al integrar tecnologías inteligentes que mejoran la calidad de vida, la autogestión de la salud y el apoyo social⁴⁵. Por otro lado, el uso de algoritmos de IA junto con una plataforma de teleasistencia domiciliar diseñada para personas mayores que viven de forma independiente permite detectar eventos relevantes mediante sensores no intrusivos generando alertas en tiempo real⁴⁶. En la misma línea, la iniciativa Barcelona Brain Health Initiative (BBHI) ha desarrollado una plataforma móvil que aplica estrategias de coaching en salud cerebral y sistemas inteligentes de ayuda a la decisión (DSS), generando recomendaciones personalizadas basadas en hábitos, preferencias y motivaciones individuales⁴⁷.

En el ámbito de la salud mental, las aplicaciones móviles han mostrado utilidad en la detección y el manejo del estrés, la ansiedad y la depresión⁴⁸. Incorporan algoritmos de IA para evaluar el estado emocional y cognitivo, ofrecer programas de entrenamiento adaptativo, monitorizar síntomas en tiempo real y generar intervenciones proactivas. Los modelos de IA se utilizan para analizar fragmentos de voz espontánea del



paciente -por ejemplo, durante una llamada- y detectar indicadores de depresión o ansiedad (tono monótono, pausas largas, energía vocal baja). Estas herramientas, integradas en entornos de telepsiquiatría, cuantifican objetivamente la evolución del paciente a lo largo del tratamiento. Además, los smartphones pueden registrar datos de comportamiento relevantes como actividad física, patrones de sueño, uso de aplicaciones o geolocalización, que permiten construir fenotipos digitales útiles para el seguimiento psiquiátrico⁴⁹.

Una aplicación destacada de los algoritmos de IA es la personalización de recomendaciones de estilo de vida –dieta, actividad física o hábitos de vida preventivos– según las características individuales de cada persona. En este contexto, la nutrición de precisión⁵⁰ intenta personalizar la dieta según factores propios de cada individuo (perfil genético, microbioma intestinal, metabolismo, preferencias, y necesidades clínicas) con fines tanto preventivos como terapéuticos. Entre las aplicaciones actuales de la nutrición de precisión figuran la adaptación de planes dietéticos saludables, la prevención de enfermedades y el tratamiento persona-

lizado de patologías crónicas como la diabetes o la obesidad. Un estudio demostró que la respuesta glucémica postprandial a los alimentos varía significativamente entre personas y desarrolló un algoritmo de aprendizaje máquina capaz de predecir dicha respuesta a partir de datos individuales (bioquímicos, antropométricos, dietéticos, actividad física y microbiota)⁵¹. Al validar el modelo, los investigadores diseñaron dietas personalizadas mostrando que se producían picos menores de glucosa con la dieta personalizada que con una dieta no adaptada.

Al igual que con la nutrición, existe interés en personalizar los programas de actividad física a las necesidades y condiciones individuales. Los algoritmos de IA se utilizan para crear entrenadores virtuales que, basados en los datos de monitorización del usuario, generan planes de ejercicio dinámicos. Un estudio reciente basado en una aplicación móvil con IA que combinaba datos de sensores (frecuencia cardiaca, pasos y calorías) con objetivos del usuario para sugerir entrenamientos diarios adaptados ha demostrado la capacidad para prescribir programas de ejercicio durante 30 días adaptados a dis-



tintos perfiles de pacientes para usuarios con diferentes condiciones de salud⁵². Aunque se respetaban principios generales de progresión y adecuando los programas al estado de cada individuo, se observaron limitaciones al tratar condiciones médicas complejas.

Por tanto, las herramientas de IA están permitiendo la transición desde recomendaciones generales a intervenciones de salud ajustadas al fenotipo, genotipo y el contexto de cada individuo. Los estudios iniciales muestran resultados prometedores en ámbitos como el control de peso, el sueño, la gestión del estrés o la promoción de hábitos saludables. La adopción creciente de las aplicaciones móviles con IA orientadas al autocuidado y el envejecimiento saludable, impulsada por la digitalización del sistema de salud y la necesidad de soluciones sostenibles frente al envejecimiento poblacional, augura un impacto positivo en la calidad de vida y la eficiencia del sistema sanitario. En conjunto, están configurando un nuevo paradigma de atención sanitaria más personalizado, preventivo y centrado en el usuario.

4.3. Aplicaciones de la IA en medicina personalizada y fenotipo digital.

La medicina personalizada busca adaptar la atención médica a las características individuales de cada paciente, integrando información genética, clínica y de estilo de vida para guiar decisiones terapéuticas. En este contexto, el fenotipado digital hace referencia al análisis continuo de variables de salud mediante datos recogidos por dispositivos digitales, como smartphones o wearables, generando un perfil dinámico del estado del paciente^{49,53}. En los últimos años, la irrupción de técnicas de IA ha hecho realidad este enfoque al permitir la detección de patrones complejos en grandes volúmenes de datos y ofrecer apoyo a la toma de decisiones clínicas de forma individualizada^{54,55}.

Una característica fundamental de la medicina personalizada es la integración de datos masivos y heterogéneos de cada individuo. Las principales fuentes de datos empleadas en sistemas actuales de IA aplicada a salud móvil y medicina personalizada incluyen:

- **Datos genómicos y ómicos:** la secuenciación del genoma y otras tecnologías ómicas (transcriptómica, proteómica, metabolómica) proporcionan un mapa detallado de las variantes genéticas y biomarcadores de un

paciente. Estos datos permiten estimar la predisposición a enfermedades e identificar posibles dianas terapéuticas. Dada su complejidad, se emplean algoritmos de IA para priorizar mutaciones relevantes y correlacionarlas con fenotipos clínicos o respuestas a fármacos.

- **Historia clínica electrónica (HCE):** contiene información clínica longitudinal sobre diagnósticos, resultados de laboratorio, tratamientos, notas de evolución y pruebas médicas. Constituye una fuente valiosa para los algoritmos de IA, aunque presenta desafíos debido a la combinación de datos estructurados y texto libre. Las técnicas de NLP permiten extraer información de notas médicas, identificar fenotipos y alimentar modelos predictivos.

- **Sensores y dispositivos médicos:** los wearables (relojes inteligentes, pulseras de actividad, monitores de glucosa continua, etc.) generan un flujo de datos fisiológicos del paciente durante su vida diaria, incluyendo variables como la frecuencia cardíaca, el ritmo cardíaco, la presión arterial, los niveles de actividad física o el sueño. Estos datos de la vida real enriquecen el fenotipo del paciente más allá de las medidas obtenidas de forma puntual en la consulta médica. Los algoritmos de IA permiten detectar anomalías o extraer tendencias en las series temporales en tiempo real.

- **Datos de comportamiento y entornos digitales:** la vida digital del paciente como el uso del smartphone, la geolocalización, el texto escrito, el tono de voz o la actividad en redes sociales constituyen una fuente de datos emergente para construir el fenotipo digital. Estos datos, combinados con algoritmos de IA, aportan una capa adicional de personalización. Por ejemplo, en salud mental, características como el tono de voz, la inflexión del habla, el patrón de actividad en redes sociales o la geolocalización pueden actuar como marcadores indirectos del estado anímico o cognitivo⁵⁶.

El fenotipado de precisión se concibe como un elemento fundamental de la medicina del futuro, al permitir una caracterización más completa de los estados de salud y enfermedad⁵⁷. Para ello, se emplean ontologías que permiten estandarizar la definición de los fenotipos y se integran disciplinas ómicas junto con algoritmos de IA aplicados a grandes volúmenes de datos. De esta forma, se obtiene una descripción minuciosa y uniforme de los rasgos de cada sujeto, posibilitando diagnósticos más acertados y tratamientos personalizados.



La integración de la IA con el fenotipado digital está redefiniendo la medicina personalizada. El análisis de datos multimodales —clínicos, fisiológicos, conductuales y genómicos— permite construir perfiles individuales y guiar decisiones más informadas.

4.4. Chatbots y asistentes virtuales en salud

Los chatbots de salud son programas conversacionales combinados con algoritmos de NLP que pueden simular diálogos humanos para ayudar en distintas aplicaciones clínicas. En el ámbito de la salud móvil, estos asistentes virtuales han ganado protagonismo en los últimos años, ofreciendo a los pacientes soporte inmediato y personalizado^{43,58-60}. Los chatbots en aplicaciones móviles abarcan una variedad de usos clínicos, centrándose generalmente en áreas como las mencionadas anteriormente: gestión de enfermedades crónicas, promoción de hábitos saludables, o salud mental.

En la gestión de enfermedades crónicas como la diabetes, la hipertensión o la obesidad, los chatbots se están consolidando como entrenadores de salud digitales, al ofrecer recordatorios y educación personalizada sobre medicación, dieta, ejercicio y control de variables fisiológicas. En diabetes, diversas soluciones permiten registrar los niveles de glucosa, proporcionar consejos nutricionales y ajustar recomendaciones en tiempo real^{61,62}. Estas herramientas, promueven la autonomía del paciente, facilitando el acceso a información fiable y apoyo inmediato, y actúan como complemento entre visitas médicas. Muchos de estos asistentes digitales incluyen contenidos de educación diabetológica —como prevención de complicaciones y administración de insulina— e incluso apoyo emocional frente a la carga psicológica de la enfermedad. Las primeras evaluaciones sugieren beneficios clínicos modestos pero significativos. Un meta-análisis reciente, aunque basado mayoritariamente en estudios piloto o cuasi-experimentales, identificó mejoras en el control glucémico de pacientes con diabetes que utilizaron chatbots⁶¹. Aunque la evidencia aún es preliminar, estos resultados señalan que los chatbots podrían reforzar la autogestión del paciente crónico y complementar el seguimiento médico entre visitas.

En oncología, los chatbots con algoritmos de IA también se emplean para ofrecer apoyo emocional y educativo. Un ejemplo destacado es el asistente vir-

tual Dave, integrado en una red social de pacientes con cáncer. Entrenado en contenidos oncológicos, este bot conversacional proporciona respuestas personalizadas las 24 horas, recuerda citas y medicación, y explica efectos secundarios utilizando lenguaje natural⁶³. Aunque no monitoriza signos físicos, ofrece acompañamiento psicológico e información contextualizada, elementos clave en el manejo de enfermedades crónicas

Una gran proporción de los estudios publicados sobre chatbots y asistentes virtuales en salud se centra en intervenciones de salud mental, reflejando la necesidad creciente de apoyo psicológico accesible. Existen chatbots que ofrecen intervenciones psicológicas basadas en terapias cognitivo-conductuales (TCC) para gestionar la ansiedad, depresión, estrés y otros trastornos emocionales⁶⁴. Estas aplicaciones actúan como terapeutas virtuales disponibles las 24 horas, ofreciendo un entorno seguro y libre de juicio donde los usuarios pueden expresar sus preocupaciones. Los usuarios suelen percibir estos asistentes como herramientas empáticas y fiables, especialmente en momentos en los que no cuentan con apoyo humano inmediato.

Entre las aplicaciones más destacadas se encuentra Wysa^{65,66}, un asistente virtual basado en IA que emplea técnicas de TCC y mindfulness, personalizando las respuestas mediante algoritmos supervisados y procesamiento del lenguaje natural. Por otro lado, la aplicación Woebot ofrece acompañamiento a personas con síntomas leves de ansiedad o depresión mediante conversaciones estructuradas guiadas por TCC^{67,68}. La evidencia preliminar sugiere que estas intervenciones pueden contribuir a reducir el estrés y aumentar la resiliencia en diversas poblaciones, tanto clínicas como no clínicas⁶⁷. El uso de estas plataformas se ha expandido rápidamente, con millones de usuarios en todo el mundo y una creciente adopción en Europa y Estados Unidos. En términos regulatorios, el potencial clínico de estas herramientas comienza a ser reconocido: la FDA ha otorgado a Wysa la designación de *Breakthrough Device*, acelerando así el proceso de validación clínica⁶⁹.

Muchos chatbots móviles actúan como educadores de salud, ofreciendo información fiable y comprensible sobre enfermedades, tratamientos y medicamentos. Pueden resolver dudas frecuentes en lenguaje sencillo, aclarar dudas tras un diagnóstico reciente o preparar al paciente para intervenciones quirúrgicas o pruebas

diagnósticas. Gracias a su formato conversacional, adaptan las explicaciones al nivel de comprensión del usuario y detectan posibles lagunas de entendimiento. Estas herramientas contribuyen a mejorar la alfabetización en salud y a reforzar el papel activo del paciente en el autocuidado⁷⁰. Su uso en educación sanitaria y promoción de hábitos saludables ha mostrado eficacia en áreas específicas como el aumento de la actividad física, la mejora de la adherencia terapéutica o la reducción del estrés percibido, aunque frecuentemente se evalúan como parte de intervenciones digitales más amplias⁷¹. En el ámbito de la prevención, la pandemia de COVID-19 impulsó el uso de chatbots informativos a gran escala, demostrando su capacidad para difundir mensajes de salud pública y combatir la desinformación de forma ágil. Aunque la evidencia formal sobre su impacto en educación y prevención es menor que en salud mental, los resultados preliminares indican beneficios claros y una alta aceptación por parte de los usuarios, especialmente cuando la información es pertinente, comprensible y oportuna⁷⁰.

Otro uso relevante de los chatbots en salud es el triaje, orientado a ayudar a los usuarios a evaluar sus síntomas y decidir si necesitan atención médica. Estos asistentes simulan una entrevista clínica, formulando preguntas sobre síntomas y antecedentes para sugerir posibles causas y el nivel de atención adecuado (autocuidado, consulta con atención primaria o visita a urgencias). Herramientas como Ada Health⁷², WebMD⁷³ o Buoy⁷⁴ se han popularizado como sistemas de orientación previa a la atención presencial, y algunos servicios de salud ya las han integrado en sus plataformas digitales. No obstante, la evidencia sobre su precisión diagnóstica y seguridad ha sido variable. Un estudio de casos simulados indica que algunas herramientas alcanzan buenos resultados en la detección de situaciones que requieren una consulta y proporcionan recomendaciones apropiadas en la mayoría de situaciones urgentes⁷⁵. Pese a estos resultados prometedores, la comunidad científica señala la necesidad de realizar más estudios independientes que evalúen la fiabilidad diagnóstica y el impacto clínico antes de considerar estos sistemas como parte del estándar asistencial.

La IA generativa ha revolucionado el ámbito de la salud móvil personalizada, dando lugar a una nueva generación de asistentes virtuales inteligentes que pueden personalizar consejos de autocuidado, reali-

zar entrenamiento o coaching en salud o proporcionar apoyo emocional de forma interactiva. Estos sistemas han mejorado la interacción entre pacientes y profesionales, optimizando procesos y facilitando el acceso a información médica. Los algoritmos de IA generativa, entrenados con grandes conjuntos de datos en lenguaje natural, pueden generar respuestas coherentes y contextuales. A diferencia de los chatbots tradicionales, las soluciones generativas actuales pueden entender preguntas complejas en lenguaje natural y producir respuestas matizadas adaptadas al contexto del usuario. Esto permite proporcionar experiencias de uso más dinámicas, empáticas y proactivas, lo que resulta especialmente prometedor para mejorar la adherencia a hábitos saludables, la educación del paciente y el acompañamiento psicológico.

Las aplicaciones móviles de bienestar y autocuidado han comenzado a incorporar IA generativa para ofrecer coaching personalizado en nutrición, ejercicio y estilo de vida. Un ejemplo destacado es la plataforma HealthifyMe, que integra el modelo GPT-4 en su asistente virtual nutricional⁷⁶. De este modo, el sistema puede responder consultas complejas de los usuarios correlacionando datos personales – por ejemplo, relacionando los registros de glucosa, alimentación y sueño. Con los algoritmos de IA generativa, el sistema ofrece orientaciones nutricionales y de ejercicio altamente personalizadas, lo que ha disparado la participación de los usuarios. Del mismo modo, la función Snap de HealthifyMe utiliza GPT-4 con visión para reconocer alimentos en fotos, logrando identificar múltiples ingredientes con una alta precisión. En la misma línea, Google está entrenando un modelo de salud personal basado en IA generativa (Personal Health LLM) integrado con datos de wearables como Fitbit para ofrecer recomendaciones ajustadas a la actividad física, ritmo cardíaco y patrones de sueño de cada usuario⁷⁷. Este modelo es capaz de razonar sobre los datos longitudinales de un individuo y ofrecer sugerencias específicas. La capacidad de interpretar datos complejos de sensores y contextualizarlos con conocimiento médico permite a estos asistentes proporcionar recomendaciones de salud más personalizadas para el usuario. En un futuro cercano, es previsible que estos entrenadores en el móvil evolucionen hacia agentes proactivos: en lugar de esperar a que el usuario pregunte, podrán monitorizar tendencias en

los datos y sugerir intervenciones a tiempo. El equipo de HealthifyMe prevé desarrollar agentes autónomos que, con permiso del usuario, realicen acciones como agendar una sesión de ejercicio o pedir comida saludable cuando identifiquen una oportunidad de mejorar hábitos.

El área de la salud mental móvil ha integrado rápidamente los chatbots basados en modelos generativos para ofrecer apoyo emocional y terapia guiada. Estas aplicaciones proporcionan un compañero conversacional disponible las 24 horas que puede dialogar con el usuario, ayudarlo a procesar emociones o enseñar técnicas de afrontamiento. Usuarios de chatbots como ChatGPT han llegado a comparar favorablemente al “terapeuta de IA” con la terapia humana en ciertos aspectos⁷⁸. Un ensayo clínico aleatorizado ha demostrado la eficacia terapéutica de un chatbot generativo llamado *Therabot*⁷⁹. Las ventajas de estos terapeutas virtuales son enormes: ofrecen apoyo inmediato en cualquier momento, eliminan barreras de estigma (son anónimos) y pueden llegar a usuarios sin acceso a psicólogos en su zona. De este modo, los algoritmos de IA generativa podrían democratizar el apoyo mental a través del smartphone. Aún así, los expertos advierten que se necesitan garantías de seguridad más robustas y mejorar la memoria contextual del asistente virtual para que recuerde detalles de sesiones previas y pueda dirigir el proceso terapéutico de forma más coherente. Por otro lado, sigue siendo necesario que los profesionales supervisen su uso, y que estas herramientas se utilicen como complemento y no reemplazo total de la terapia humana.

Otra aplicación emergente de los algoritmos de IA generativa en salud móvil es la educación interactiva del paciente y el apoyo en el autocuidado diario de condiciones médicas. Los modelos generativos pueden actuar como educadores personales de bolsillo, resolviendo preguntas en lenguaje sencillo y adaptándose al nivel de comprensión de cada individuo. Una revisión de 2024 identificó múltiples usos potenciales de los grandes modelos de lenguaje en la educación al paciente, entre ellos: generar materiales educativos personalizados, interpretar informes o resultados médicos en términos comprensibles, dar recomendaciones de estilo de vida específicas, apoyar en el uso correcto de medicación, ofrecer instrucciones pre y postoperatorias ajustadas al caso, e incluso optimi-

zar la comunicación durante la visita médica⁸⁰. No obstante, hay consideraciones importantes a tener en cuenta. Los modelos actuales pueden cometer errores o simplificaciones excesivas. De hecho, los investigadores señalan retos de legibilidad, exactitud y posibles sesgos en el contenido generado para pacientes. Un estudio comparativo con otros asistentes virtuales tradicionales en diagnóstico y triaje, no recomienda el uso no supervisado de estas herramientas e insiste en la necesidad de validarlas desde el punto de vista clínico previamente a su uso⁸¹. Por ello, se están explorando enfoques híbridos que aseguren la calidad del contenido médico generado al combinarlo con bases de conocimiento verificadas (*Retrieval Augmented Generation*)⁸², de modo que las respuestas vengan respaldadas por fuentes médicas seguras⁸³.

4.5. Protección de datos y ética en salud móvil y medicina personalizada

La irrupción de la IA en la salud móvil y la medicina personalizada plantea importantes desafíos en materia de protección de datos y ética. A continuación, se analizan cuatro elementos clave: 1) Consideraciones éticas; 2) Explicabilidad y transparencia de los algoritmos; 3) Seguridad de los datos; y 4) Evaluación de aplicaciones de salud móvil.

4.5.1. Consideraciones éticas en el uso de IA en la monitorización remota

El uso de IA en salud móvil y medicina personalizada ofrece oportunidades para mejorar la atención sanitaria, pero también plantea dilemas éticos importantes. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha resumido los principios éticos en su informe sobre “Ética y gobernanza de la inteligencia artificial en el ámbito de la salud”⁸⁴, destacando seis pilares principales para el uso responsable de los algoritmos de IA en salud: proteger la autonomía, promover la seguridad y el bienestar de las personas, garantizar la transparencia, fomentar la responsabilidad, asegurar la equidad y diseñar herramientas sostenibles.

- **Autonomía y consentimiento:** Es imprescindible respetar el derecho del paciente a decidir sobre el uso de tecnologías que recopilan sus datos en el

hogar. El paciente debe dar consentimiento informado explícito para ser monitorizado, entendiendo qué datos se recogen y con qué fin. Además, debe conservar cierto control, por ejemplo pudiendo pausar la monitorización o excluyendo datos que considere demasiado invasivos. Se debe garantizar que los datos recogidos remotamente no se usen fuera del contexto acordado.

- **Equidad y no discriminación:** La monitorización remota asistida por IA debe beneficiar a todos por igual. Sin embargo, existen riesgos de sesgos algorítmicos que lleven a disparidades. Si el algoritmo es entrenado con datos de una población poco diversa, puede arrojar resultados menos precisos en grupos minoritarios. También es importante considerar la equidad en el acceso: poblaciones rurales, de bajos ingresos o personas mayores pueden tener menos acceso o habilidades para usar aplicaciones avanzadas. Implementar IA en salud móvil sin solventar la brecha digital podría agravar desigualdades en vez de reducirlas.
- **Responsabilidad y supervisión humana:** Un principio ético clave es que la responsabilidad última de las decisiones clínicas recae en humanos, no en las máquinas. Los algoritmos de IA pueden apoyar pero no reemplazar el juicio clínico, especialmente en monitorización remota donde las alertas o recomendaciones del algoritmo guían acciones sobre el paciente en su hogar. Es necesario definir claramente quién es responsable si un algoritmo comete un error o el sistema genera una recomendación errónea. Las directrices europeas insisten en mantener siempre supervisión humana (principio de “*human-in-the-loop*”) para que los algoritmos de IA no actúen de forma totalmente autónoma en decisiones que afectan a la salud de las personas⁸⁵.
- **Bienestar:** La introducción de IA debe aportar un beneficio tangible (mejor seguimiento, prevención de complicaciones) y minimizar posibles daños. Un riesgo en monitorización remota es el agotamiento por la generación de alertas falsas: si el algoritmo es demasiado sensible, puede generar muchas alarmas innecesarias, causando estrés al paciente y sobrecarga al profesional. Éticamente,

se debe buscar un balance adecuado en los parámetros de los algoritmos de IA para maximizar la detección de problemas reales minimizando los falsos positivos. Asimismo, la seguridad de estos sistemas debe ser rigurosamente probada antes de su despliegue.

España cuenta con comités de bioética que analizan proyectos de salud digital y medicina personalizada con IA antes de su implementación en sistemas públicos, para garantizar que cumplan con la legislación (Reglamento General de Protección de Datos 2016/679 (RGPD), Ley 41/2002, básica reguladora de la autonomía del paciente y de derechos y obligaciones en materia de información y documentación clínica) y con los principios de ética médica tradicionales adaptados al nuevo contexto tecnológico.

4.5.2. Explicabilidad y transparencia en los algoritmos de IA en salud móvil

La explicabilidad en IA se refiere a la necesidad de mostrar de forma comprensible cómo y por qué el algoritmo toma ciertas decisiones o realiza predicciones, haciendo transparente el funcionamiento del mismo. Los algoritmos de IA, especialmente los basados en redes neuronales o aprendizaje profundo, suelen ser complejos y poco interpretables. En ámbitos como la medicina, donde comprender el motivo de una decisión es clave para generar confianza, la falta de explicabilidad puede resultar problemática. Un sistema explicable facilita la detección de errores o sesgos y ayuda a detectar si no funciona dentro de límites aceptables.

Los organismos de regulación internacional están promoviendo la transparencia en el uso de los algoritmos de IA. En 2021, la FDA, Health Canada y la agencia reguladora británica MHRA publicaron principios conjuntos de “Buenas Prácticas en Aprendizaje Automático” destacando la importancia de ofrecer a los usuarios información clara y esencial sobre el uso previsto, el rendimiento y la lógica interna de los sistemas de IA en medicina⁸⁶. En la Unión Europea, el Reglamento de IA (AI Act) que entró en vigor en 2024⁸⁷, clasifica los sistemas de IA en salud como de alto riesgo y exige su registro en una base de datos pública, incluyendo información que refuerce su transparencia.



4.5.3. Seguridad de los datos y riesgos

La seguridad de los datos en aplicaciones de salud basadas en IA es un aspecto crítico, dada la sensibilidad de la información que manejan (datos médicos, de hábitos diarios, geolocalización, etc.). El RGPD y las leyes nacionales consideran datos de salud cualquier información relativa a la salud física o mental de una persona, sea generado por un hospital o por una aplicación, y los consideran una categoría especial de datos con máxima protección. Las aplicaciones de salud en España requieren consentimiento explícito del usuario para tratar datos y están sujetas a inspecciones de la Agencia Española de Protección de Datos (AEPD). Los principales riesgos incluyen: violaciones de privacidad por brechas de seguridad o usos no autorizados de datos, ciberataques que expongan historias clínicas, falta de cumplimiento de regulaciones de protección de datos, y problemas de calidad/integridad de datos que afecten a las decisiones de los algoritmos de IA.

Otro riesgo es la reutilización secundaria de los datos. Los datos recogidos con fines legítimos de salud podrían usarse para otros propósitos. Desde el punto de vista ético y legal, en Europa no está prohibido, pero exige medidas técnicas: pseudonimización, acuerdos contractuales con los encargados del procesamiento de los datos, y transparencia hacia el usuario.

En cuanto a medidas clásicas de ciberseguridad, las aplicaciones móviles de salud deben implementar cifrado fuerte de los datos tanto en tránsito como en el almacenamiento local. Proporcionar una autenticación robusta al usuario, y autenticación mutua entre la aplicación y el servidor es esencial para prevenir accesos no autorizados o suplantación. Asimismo, los datos en la nube deberían almacenarse en entornos con certificaciones de seguridad. Un riesgo específico es el de los dispositivos médicos conectados (como sensores de glucosa o monitores de pulso cardíaco que se sincronizan con el dispositivo móvil), ya que podrían ser hackeados si tienen firmware vulnerable. Por ello, la seguridad debe abarcar por diseño todo el ecosistema de salud digital, desde la aplicación móvil y los algoritmos de IA que procesan los datos, hasta los sensores y wearables.

Otro aspecto que afecta a la seguridad de los datos es la calidad e integridad de los datos usados por



los algoritmos de IA. Un riesgo es que datos corruptos o falsos ingresen al sistema y supongan decisiones clínicas erróneas. Por ejemplo, si un sensor registra lecturas equivocadas por un fallo, el algoritmo podría proporcionar recomendaciones inapropiadas. Para mitigar este problema se pueden implementar mecanismos de detección de anomalías en las entradas de datos y validar con otras fuentes cuando sea posible. En monitorización remota, puede ser conveniente confirmar las alertas críticas con una segunda medición o contacto humano antes de actuar.

La UE y España tienen un marco legal robusto (RGPD y Ley Orgánica 3/2018 de Protección de Datos Personales) que obliga a obtener consentimiento, minimizar los datos recopilados, notificar brechas de seguridad en 72 horas y realizar Evaluaciones de Impacto en Protección de Datos antes de desplegar sistemas de salud con algoritmos de IA a gran escala.



4.5.4. Evaluación de aplicaciones de salud móvil

La rápida expansión de soluciones digitales de salud ha generado la necesidad de evaluar sistemáticamente su efectividad clínica, seguridad técnica y valor real añadido al paciente. Actualmente, muchas aplicaciones llegan al mercado sin una evaluación clínica rigurosa previa, generando incertidumbre sobre su fiabilidad y eficacia. En este contexto, han surgido marcos de evaluación internacionales, como el modelo del Consorcio Internacional para la Medición de Resultados en Salud (ICHOM, por sus siglas en inglés)⁸⁸, que propone métricas estándar centradas en el paciente. ICHOM permite medir sistemáticamente resultados clínicos y conjuntos de PROMs (Patient-Reported Outcome Measures) o cuestionarios estandarizados que miden el estado de salud desde la perspectiva del paciente, facilitando comparaciones objetivas y transparentes del verdadero impacto de estas tecnologías en la calidad de vida, la recuperación funcional o supervivencia. ICHOM ha de-

sarrollado cerca de 40 conjuntos standard de métricas de resultados para más de 15 condiciones médicas, cubriendo aproximadamente el 40% de las enfermedades con mayor prevalencia.

Paralelamente, iniciativas regulatorias como los “Criterios de Evaluación de Tecnología Digital” (DTAC, Digital Technology Assessment Criteria) desarrollados por el NHS en Reino Unido, han reforzado la importancia de evaluar no solo los resultados clínicos, sino también la seguridad de datos, interoperabilidad y accesibilidad de las aplicaciones antes de su integración en sistemas sanitarios públicos⁸⁹.

La evaluación de aplicaciones de salud está evolucionando hacia un modelo estructurado y basado en la evidencia. Modelos como ICHOM resultan ser una pieza fundamental, al proporcionar un lenguaje común para medir el verdadero impacto de la salud móvil y la medicina personalizada asistida por IA, asegurando que estas innovaciones se traduzcan en mejor salud y bienestar para los pacientes, que es en última instancia el criterio ético y de calidad más importante.

4.6. Desafíos y oportunidades para la IA en salud móvil y medicina personalizada

La IA aplicada a la salud móvil y la medicina personalizada plantea retos relevantes en materia de privacidad y seguridad de los datos. El tratamiento de información sensible – como historias clínicas, datos genéticos o fisiológicos procedentes de wearables y dispositivos médicos - conlleva riesgos significativos. Las soluciones de salud móvil y medicina personalizada deben cumplir estrictamente con el Reglamento General de Protección de Datos (RGPD) y el Reglamento Europeo de IA (AI Act) implementando medidas robustas de ciberseguridad y protección de datos desde el diseño de estos sistemas. La implementación de tecnologías innovadoras como el aprendizaje federado, que soporta el entrenamiento de modelos sin compartir datos sensibles, permite preservar la privacidad, mantiene los datos bajo control institucional y soporta la creación de modelos globales sin comprometer la seguridad.

En cuanto a la equidad y accesibilidad, existe un riesgo significativo de que la adopción desigual de estas tecnologías aumente las brechas de salud entre dife-

rentes grupos poblacionales. La IA debe diseñarse para ser inclusiva y accesible, garantizando que poblaciones vulnerables o menos digitalizadas (personas mayores, habitantes de zonas rurales o con bajos recursos) también puedan beneficiarse de estas soluciones.

La complejidad de los algoritmos de IA, especialmente aquellos basados en redes neuronales o aprendizaje profundo, dificulta la transparencia y comprensión en la toma de decisiones clínicas. Por ello, resulta esencial desarrollar técnicas de IA explicable que permitan comprender el funcionamiento y los resultados de estos modelos, favoreciendo así la confianza de profesionales y pacientes.

Para una integración efectiva de la IA en salud móvil dentro de la práctica clínica, se requiere no solo validación científica y clínica, sino también la interoperabilidad con los sistemas sanitarios existentes y formación específica para el personal sanitario. Además, es imprescindible garantizar que el paciente esté informado y otorgue su consentimiento, promoviendo así el uso responsable de estas tecnologías. Sin este enfoque integral, el impacto real de estas tecnologías en la práctica clínica será limitado.

La rápida innovación tecnológica contrasta con los tiempos más lentos de evaluación de la tecnología. Los nuevos marcos de evaluación de aplicaciones de salud digital están apoyando modelos basados en la evidencia como ICHOM, que resultan ser un elemento esencial para medir el verdadero impacto de la salud móvil y la medicina personalizada asistida por IA, asegurando que estas innovaciones se traduzcan en mejor salud y bienestar para los pacientes. Por otro lado, se requiere que los marcos regulatorios sean lo suficientemente ágiles y adaptativos para facilitar la evaluación rigurosa pero rápida de nuevas aplicaciones de salud móvil, garantizando la seguridad y eficacia clínica.

Las ventajas y oportunidades que ofrece la aplicación de IA en salud móvil y medicina personalizada son numerosas. La IA permite ofrecer una atención médica altamente personalizada basada en el registro de datos individuales como hábitos de vida y monitorización continua mediante dispositivos portátiles. La integración de algoritmos de IA con la monitorización remota posibilita la detección precoz de enfermedades y la personalización del tratamiento al perfil del paciente; como resultado, contribuye a la obtención de mejo-

res resultados clínicos. En concreto, el uso de IA en la gestión de enfermedades crónicas mediante monitorización remota y sistemas predictivos puede reducir significativamente las hospitalizaciones y las complicaciones médicas, optimizando los recursos sanitarios y mejorando la calidad de vida de los pacientes.

Las soluciones de salud digital móvil soportadas por IA facilitan la llegada de servicios sanitarios a zonas remotas o con difícil acceso a centros sanitarios especializados. Herramientas como asistentes virtuales y entrenadores personales, sistemas de teleconsulta y monitorización continua tienen el potencial de reducir barreras geográficas y económicas.

Los algoritmos de IA generativa ya están ampliando las fronteras del autocuidado móvil al ofrecer un coaching más inteligente y personalizado. Las aplicaciones actualmente en desarrollo apuntan a integrar estos modelos con datos personales en tiempo real, logrando un acompañamiento continuo en la vida diaria del usuario. Esto puede redundar en la consecución de mejores resultados clínicos desde el punto de vista preventivo gracias al uso de una solución de guiado adaptada constantemente a las necesidades individuales. En el futuro, los asistentes educativos en el móvil podrían volverse más multimodales, ofreciendo no solo texto sino también ilustraciones generadas automáticamente (imágenes, infografías explicativas e incluso videos breves) para ayudar a la comprensión del paciente.

La Salud 4.0 representa un nuevo paradigma de salud digital impulsado por tecnologías emergentes de la industria, con el objetivo de avanzar hacia una medicina de precisión centrada en las características individuales del paciente. Este modelo se apoya en la IA, las comunicaciones móviles 5G, la fabricación avanzada de dispositivos portátiles, la computación en el borde (*edge computing*) y el Internet de las Cosas Médicas (IoMT)⁹⁰. La combinación de estas tecnologías está transformando la asistencia sanitaria, permitiendo modelos más proactivos y preventivos, y mejorando tanto la atención al paciente como la eficiencia del sistema. El IoMT genera grandes volúmenes de datos que requieren análisis en tiempo real para optimizar el rendimiento y la calidad del servicio de las aplicaciones que integran estos dispositivos. La computación en el borde, potenciada por redes 5G, permite distribuir el procesamiento entre dispositivos, reduciendo la latencia y facilitando la



monitorización remota y la gestión eficiente de datos clínicos. Además, la integración de IA en el borde (Edge AI) posibilita aplicaciones en tiempo real como la detección precoz de enfermedades cardíacas, el diagnóstico automatizado, la gestión de enfermedades crónicas y la personalización de terapias⁹¹.

La integración de la IA con la Realidad Aumentada (RA) está abriendo nuevas oportunidades en salud móvil y medicina personalizada. La RA aplicada a la salud móvil tiene perspectivas muy prometedoras. Su evolución dependerá de los avances tecnológicos tanto en hardware como en software. Actualmente muchas aplicaciones se ejecutan en smartphones o tablets, pero en el futuro es probable que surjan en el mercado gafas inteligentes de RA con soluciones específicas para salud. Además, la mejora en conectividad (como la expansión de redes 5G) permitirá la transmisión de datos y vídeo de alta calidad en tiempo real, haciendo más viable la telemedicina inmersiva y colaborativa a distancia. Asimismo, la RA podría complementarse con sensores o dispositivos médicos. Gracias a algoritmos avanzados, los sistemas de RA pueden interpretar el entorno, adaptar la información al usuario y apoyar la toma de decisiones clínicas en tiempo real. Esta combinación permite crear experiencias interactivas y per-

sonalizadas, desde rehabilitación física hasta terapias psicológicas. Además, la IA dota a la RA de capacidades predictivas, facilitando intervenciones preventivas y asistencia en el autocuidado.

Los gemelos digitales ofrecen importantes oportunidades en medicina personalizada al permitir la creación de réplicas virtuales de pacientes que integran datos clínicos, genómicos, ambientales y de estilo de vida. Esta tecnología permite simular respuestas individuales a tratamientos, optimizar intervenciones y predecir complicaciones antes de que se manifiesten. Combinados con inteligencia artificial, mejoran la toma de decisiones clínicas y posibilitan una atención más proactiva y centrada en el paciente. Esta tecnología puede revolucionar la medicina personalizada y predictiva.

En definitiva, la IA en salud móvil y medicina personalizada ofrece múltiples oportunidades: desde una atención médica altamente personalizada hasta la mejora en la gestión de enfermedades crónicas y en la prevención. Una adopción responsable, ética y técnicamente rigurosa puede transformar significativamente la atención sanitaria, reduciendo barreras geográficas y económicas, optimizando recursos y mejorando la calidad de vida de los pacientes.

4.7. Referencias

- **1.** Fleming GA, Petrie JR, Bergenstal RM, Holl RW, Peters AL, Heinemann L. Diabetes digital app technology: benefits, challenges, and recommendations. A consensus report by the European Association for the Study of Diabetes (EASD) and the American Diabetes Association (ADA) Diabetes Technology Working Group. *Diabetologia*. 2020; 63(2):229–41. doi: 10.1007/S00125-019-05034-1
- **2.** Corsica JA, Kelly MC, Bradley LE, Konsor MM, Wilson EJ, Quinones IC, et al. Mobile apps for diabetes self-management: An updated review of app features and effectiveness. *J Behav Med*. 2024;48(1):137–48. doi: 10.1007/S10865-024-00525-Y
- **3.** Nwokolo M, Hovorka R. The Artificial Pancreas and Type 1 Diabetes. *J Clin Endocrinol Metab*. 2023;108(7):1614–23. doi: 10.1210/CLINEM/DGAD068
- **4.** Hughes MS, Addala A, Buckingham B. Digital Technology for Diabetes. *New England Journal of Medicine*. 2023; 389(22):2076–86. doi: 10.1056/NEJMra2215899
- **5.** Hernando ME, García-Sáez G, Martínez-Sarriegui I, Rodríguez-Herrero A, Pérez-Gandía C, Rigla M, et al. Automatic data processing to achieve a safe telemedical artificial pancreas. *J Diabetes Sci Technol*. 2009;3(5):1039–46. doi: 10.1177/193229680900300507
- **6.** Pérez-Gandía C, García-Sáez G, Subías D, Rodríguez-Herrero A, Gómez EJ, Rigla M, et al. Decision Support in Diabetes Care: The Challenge of Supporting Patients in Their Daily Living Using a Mobile Glucose Predictor. *J Diabetes Sci Technol*. 2018;12(2):243–50. doi: 10.1177/1932296818761457
- **7.** Alshehri OS, Alshehri OM, Samma H. Blood Glucose Prediction Using RNN, LSTM, and GRU: A Comparative Study. *Proceedings - IEEE International Conference on Advanced Systems and Emergent Technologies, IC_ASET 2024*;1–5. doi:10.1109/IC_ASET61847.2024.10596176
- **8.** Kriventsov S, Lindsey A, Hayeri A. The Diabits App for Smartphone-Assisted Predictive Monitoring of Glycemia in Patients With Diabetes: Retrospective Observational Study. *JMIR Diabetes*. 2020;5(3). doi: 10.2196/18660
- **9.** Carrillo-Moreno J, Pérez-Gandía C, Sendra-Araranz R, García-Sáez G, Hernando ME, Gutiérrez Á. Long short-term memory neural network for glucose prediction. *Neural Comput Appl*. 2020; 33(9):4191–203. doi: 10.1007/s00521-020-05248-0
- **10.** Zhu T, Li K, Herrero P, Georgiou P. Deep Learning for Diabetes: A Systematic Review. *IEEE J Biomed Health Inform*. 2021;25(7):2744–57. doi: 10.1109/JBHI.2020.3040225.
- **11.** Phillip M, Nimri R, Bergenstal RM, Barnard-Kelly K, Danne T, Hovorka R, et al. Consensus Recommendations for the Use of Automated Insulin Delivery Technologies in Clinical Practice. *Endocr Rev*. 2023;44(2):254–80. doi: 10.1210/endrev/bnac022.
- **12.** Moon SJ, Jung I, Park CY. Current Advances of Artificial Pancreas Systems: A Comprehensive Review of the Clinical Evidence. *Diabetes Metab J*. 2021;45(6):813–39. doi:10.4093/dmj.2021.0177
- **13.** Grupo de trabajo de tecnologías aplicadas a la diabetes de la Sociedad Española de Diabetes. Guía de uso de sistemas de Asa cerrada 2025. 2025. https://www.sediabetes.org/wp-content/uploads/GTTAD_GUIA_SAC_2025_vF.pdf
- **14.** Wilson LM, Jacobs PG, Riddell MC, Zaharieva DP, Castle JR. Opportunities and challenges in closed-loop systems in type 1 diabetes. *Lancet Diabetes Endocrinol*. 2022;10(1):6–8. doi: 10.1016/S2213-8587(21)00289-8
- **15.** Hernando ME, García-Sáez G, Gómez EJ, Pérez-Gandía C, Rodríguez-Herrero A. Automated Insulin Delivery: The Artificial Pancreas Technical Challenges. *American Journal of Therapeutics*. 2020;27(1):E62–70. doi: 10.1097/MJT.0000000000001086
- **16.** Nimri R, Battelino T, Laffel LM, Slover RH, Schatz D, Weinzimer SA, et al. Insulin dose optimization using an automated artificial intelligence-based decision support system in youths with type 1 diabetes. *Nat Med*. 2020;26(9):1380–4. doi: 10.1038/S41591-020-1045-7
- **17.** Tyler NS, Mosquera-Lopez CM, Wilson LM, Dodier RH, Branigan DL, Gabo VB, et al. An artificial intelligence decision support system for the management of type 1 diabetes. *Nature Metabolism*. 2020;2(7):612–9. doi: 10.1038/s42255-020-0212-y.
- **18.** Enfermedad cardiovascular-OMS. [cited 2025 Apr 20]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-%28cvds%29>
- **19.** Fácila Rubio L, Lozano-Granero C, Vidal-Pérez R, Barrios V, Freixa-Pamias R. Nuevas tecnologías para el diagnóstico, tratamiento y seguimiento de las enfermedades cardiovasculares. *Rev Esp Cardiol*. 2024; 77(1):88–96. doi: 10.1016/J.RECESP.2023.07.011.
- **20.** Scholte NTB, Gürgöze MT, Aydin D, Theuns DAMJ, Manintveld OC, Ronner E, et al. Telemonitoring for heart failure: a meta-analysis. *Eur Heart J*. 2023;44(31):2911–26. doi:10.1093/eurheartj/ehad280
- **21.** Wongvibulsin S, Habeos EE, Huynh PP, Xun H, Shan R, Porosnicu Rodriguez KA, et al. Digital Health Interventions for Cardiac Rehabilitation: Systematic Literature Review. *J Med Internet Res*; 23(2):e18773. doi: 10.2196/18773.
- **22.** Witharana P, Chang L, Maier R, Ogundimu E, Wilkinson C, Athanasiou T, et al. Feasibility study of rehabilitation for cardiac patients aided by an artificial intelligence web-based programme: a randomised controlled trial (RECAP trial)—a study protocol. *BMJ Open*. 2024;14(4):e079404. doi: 10.1136/BMJOPEN-2023-079404.

- **23.** Klier K, Koch L, Graf L, Schinköthe T, Schmidt A. Diagnostic Accuracy of Single-Lead Electrocardiograms Using the Kardia Mobile App and the Apple Watch 4: Validation Study. *JMIR Cardio*. 2023;7(1):e50701. doi: 10.2196/50701
- **24.** KardiaMobile 6L | AliveCor. [cited 2025 Apr 20]. <https://www.alivecor.es/kardiamobile6l>
- **25.** FibriCheck - Monitor your heart rhythm, prevent strokes. <https://www.fibrichck.com/>. [cited 2025 Apr 20]; <https://www.fibrichck.com/>
- **26.** Proesmans T, Mortelmans C, Van Haelst R, Verbrugge F, Vandervoort P, Vaes B. Mobile Phone-Based Use of the Photoplethysmography Technique to Detect Atrial Fibrillation in Primary Care: Diagnostic Accuracy Study of the FibriCheck App. *JMIR Mhealth Uhealth*. 2019;7(3):e12284. doi: 10.2196/12284
- **27.** De Ridder B, Van Rompaey B, Kampen JK, Haine S, Dilles T. Smartphone Apps Using Photoplethysmography for Heart Rate Monitoring: Meta-Analysis. *JMIR Cardio*. 2018;2(1):e4. doi: 10.2196/cardio.8802
- **28.** Iniesta-Chamorro JM, Sereno-Moyano M, Garrido-Rubiales B, Moreno-Arribas V, De Molina AR, Perez MEH, et al. The mHealth ALIBIRD Platform: Supporting Cancer Patient Treatment and Follow-up. *Proc IEEE Symp Comput Based Med Syst*. 2023;149–52. doi: 10.1109/CBMS58004.2023.00207
- **29.** DolorXcape, una aplicación para predecir los episodios de dolor crónico en pacientes oncológicos a través de inteligencia artificial. [cited 2025 Apr 20]. <https://www.grunenthal.es/medios/notas-de-prensa/2025/dolorxcape-aplicacion-para-predecir-episodios-dolor-cronico-pacientes-oncologicos>
- **30.** Sangers T, Reeder S, Van Der Vet S, Jhingoe S, Mooyaart A, Siegel DM, et al. Validation of a Market-Approved Artificial Intelligence Mobile Health App for Skin Cancer Screening: A Prospective Multicenter Diagnostic Accuracy Study. *Dermatology*. 2022;238(4):649–56. doi: 10.1159/000520474
- **31.** Smak Gregoor AM, Sangers TE, Bakker LJ, Hollenstein L, Uyl – de Groot CA, Nijsten T, et al. An artificial intelligence based app for skin cancer detection evaluated in a population based setting. *NPJ Digit Med*. 2023; 6(1). doi: 10.1038/S41746-023-00831-W.
- **32.** Freeman K, Dinnes J, Chuchu N, Takwoingi Y, Bayliss SE, Matin RN, et al. Algorithm based smartphone apps to assess risk of skin cancer in adults: systematic review of diagnostic accuracy studies. *BMJ*. 2020;368. doi: 10.1136/BMJ.M127.
- **33.** Gárate FJ, Chausa P, Whetham J, Jones CI, García F, Cáceres C, et al. EmERGE mHealth Platform: Implementation and Technical Evaluation of a Digital Supported Pathway of Care for Medically Stable HIV. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2021, Vol 18, Page 3156. 2021;18(6):3156. doi: 10.3390/IJERPH18063156
- **34.** Amir O, Abraham WT, Azzam ZS, Berger G, Anker SD, Pinney SP, et al. Remote Speech Analysis in the Evaluation of Hospitalized Patients With Acute Decompensated Heart Failure. *JACC Heart Fail*. 2022;10(1):41–9. doi: 10.1016/J.JCHF.2021.08.008.
- **35.** Shim JS, Kim BK, Kim SH, Kwon JW, Ahn KM, Kang SY, et al. A smartphone-based application for cough counting in patients with acute asthma exacerbation. *J Thorac Dis*. 2023;15(7):4053–65. doi: 10.21037/JTD-22-1492
- **36.** Claxton S, Porter P, Brisbane J, Bear N, Wood J, Peltonen V, et al. Identifying acute exacerbations of chronic obstructive pulmonary disease using patient-reported symptoms and cough feature analysis. *NPJ Digit Med*. 2021;4(1). doi: 10.1038/S41746-021-00472-X
- **37.** Lipsmeier F, Taylor KI, Postuma RB, Volkova-Volkmar E, Kilchenmann T, Mollenhauer B, et al. Reliability and validity of the Roche PD Mobile Application for remote monitoring of early Parkinson's disease. *Scientific Reports* 2022;12(1):1–15. doi: 10.1038/s41598-022-15874-4
- **38.** Creagh AP, Dondelinger F, Lipsmeier F, Lindemann M, De Vos M. Longitudinal Trend Monitoring of Multiple Sclerosis Ambulation Using Smartphones. *IEEE Open J Eng Med Biol*. 2022; 3:202. doi: 10.1109/OJEMB.2022.3221306
- **39.** Knight SR, Ng N, Tsanas A, Mclean K, Pagliari C, Harrison EM. Mobile devices and wearable technology for measuring patient outcomes after surgery: a systematic review. *npj Digital Medicine*. 2021;4(1):1–14. doi: 10.1038/s41746-021-00525-1
- **40.** De Santis KK, Jahnel T, Matthias K, Mergenthal L, Al Khayyal H, Zeeb H. Evaluation of Digital Interventions for Physical Activity Promotion: Scoping Review. *JMIR Public Health Surveill*. 2022;8(5). doi: 10.2196/37820
- **41.** Martínez-Olcina M, Cuestas-Calero BJ, Miralles-Amorós L, Vicente-Martínez M, Sánchez-Sánchez J. Effectiveness of App-Based Intervention to Improve Health Status of Sedentary Middle-Aged Males and Females. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022;19(10):5857. doi: 10.3390/IJERPH19105857.
- **42.** Yerrakalva D, Yerrakalva D, Hajna S, Griffin S. Effects of mobile health app interventions on sedentary time, physical activity, and fitness in older adults: Systematic review and meta-analysis. *J Med Internet Res*. 2019;21(11):e14343. doi: 10.2196/14343
- **43.** Aggarwal A, Tam CC, Wu D, Li X, Qiao S. Artificial Intelligence-Based Chatbots for Promoting Health Behavioral Changes: Systematic Review. *J Med Internet Res*. 2023;25. doi: 10.2196/40789

- **44.** Santis KK, Mergenthal L, Christianson L, Buskamp A, Vonstein C, Zeeb H. Digital Technologies for Health Promotion and Disease Prevention in Older People: Scoping Review. *J Med Internet Res.* 2023;25. doi: 10.2196/43542
- **45.** Guo R, Zhang J, Yang F, Wu Y. Efficacy of an Intelligent and Integrated Older Adult Care Model on Quality of Life Among Home-Dwelling Older Adults: Randomized Controlled Trial. *J Med Internet Res.* 2025;27(1):e67950. doi: 10.2196/67950
- **46.** Lopez-Guede JM, Moreno-Fernandez-De-Leceta A, Martinez-Garcia A, Graña M. Lynx: Automatic Elderly Behavior Prediction in Home Telecare. *Biomed Res Int.* 2015. doi: 10.1155/2015/201939
- **47.** Moreno-Blanco D, Solana-Sánchez J, Sánchez-González P, Jiménez-Hernando M, Cattaneo G, Roca A, et al. Intelligent Coaching Assistant for the Promotion of Healthy Habits in a Multidomain mHealth-Based Intervention for Brain Health. *Int J Environ Res Public Health.* 2021;18(20). doi: 10.3390/IJERPH182010774
- **48.** Chou YH, Lin C, Lee SH, Chien YWC, Cheng LC. Potential Mobile Health Applications for Improving the Mental Health of the Elderly: A Systematic Review. *Clin Interv Aging.* 2023;18:1523–34. doi: 10.2147/CIA.S410396
- **49.** Onnela JP, Rauch SL. Harnessing Smartphone-Based Digital Phenotyping to Enhance Behavioral and Mental Health. *Neuropsychopharmacology.* 2016;41(7):1691. doi: 10.1038/NPP.2016.7
- **50.** Galarregui C, Navas-Carretero S, Zulet MA, González-Navarro CJ, Martínez JA, de Cuevillas B, et al. Precision nutrition impact on metabolic health and quality of life in aging population after a 3-month intervention: A randomized intervention. *J Nutr Health Aging.* 2024 Jul 1;28(7):100289. doi: 10.1016/J.JNHA.2024.100289
- **51.** Zeevi D, Korem T, Zmora N, Israeli D, Rothschild D, Weinberger A, et al. Personalized Nutrition by Prediction of Glycemic Responses. *Cell.* 2015;163(5):1079–94. doi: 10.1016/j.cell.2015.11.001
- **52.** Dergaa I, Saad H Ben, El Omri A, Glenn JM, Clark CCT, Washif JA, et al. Using artificial intelligence for exercise prescription in personalised health promotion: A critical evaluation of OpenAI's GPT-4 model. *Biol Sport.* 2023;41(2):221. doi: 10.5114/BIOLSPORT.2024.133661
- **53.** Torous J, Kiang M V, Lorme J, Onnela JP. New Tools for New Research in Psychiatry: A Scalable and Customizable Platform to Empower Data Driven Smartphone Research. *JMIR Ment Health.* 2016;3(2):e16. doi: 10.2196/MENTAL.5165
- **54.** Johnson KB, Wei WQ, Weeraratne D, Frisse ME, Misulis K, Rhee K, et al. Precision Medicine, AI, and the Future of Personalized Health Care. *Clin Transl Sci.* 2020;14(1):86. doi: 10.1111/CTS.12884
- **55.** Alum EU, Ugwu OPC. Artificial intelligence in personalized medicine: transforming diagnosis and treatment. *Discover Applied Sciences.* 2025;7(3):1–5. doi: 10.1007/S42452-025-06625-X
- **56.** Li A, Liu R, Liu X, Han J. Editorial: Improving the clinical value of digital phenotyping in mental health. *Front Psychiatry.* 2023;14:1251930. doi: 10.3389/FP-SYT.2023.1251930
- **57.** Fundación Instituto Roche. Informe Anticipando Fenotipado de Precisión. https://www.instituto Roche.es/static/archivos/Informes_anticipando_2024_FENOTIPADO_PRECISION.pdf. 2024.
- **58.** Schachner T, Keller R, Wangenheim F v W. Artificial intelligence-based conversational agents for chronic conditions: Systematic literature review. *J Med Internet Res.* 2020 Sep 14;22(9). doi: 10.2196/20701
- **59.** Kurniawan MH, Handiyani H, Nuraini T, Hariyati RTS, Sutrisno S. A systematic review of artificial intelligence-powered (AI-powered) chatbot intervention for managing chronic illness. *Ann Med.* 2024;56(1). doi: 10.1080/07853890.2024.2302980
- **60.** Oh YJ, Zhang J, Fang ML, Fukuoka Y. A systematic review of artificial intelligence chatbots for promoting physical activity, healthy diet, and weight loss. *International Journal of Behavioral Nutrition and Physical Activity.* 2021 Dec 1;18(1). doi: 10.1186/s12966-021-01224-6
- **61.** Wu Y, Zhang J, Ge P, Duan T, Zhou J, Wu Y, et al. Application of Chatbots to Help Patients Self-Manage Diabetes: Systematic Review and Meta-Analysis. *J Med Internet Res.* 2024;26(1):e60380. doi: 10.2196/60380
- **62.** Empoderamiento de una nueva generación de Pacientes - Blog SocialDiabetes. [cited 2025 Apr 22]. <https://blog.socialdiabetes.com/empoderamiento-de-una-nueva-generacion-de-pacientes/>
- **63.** How Dave the AI Cancer Mentor Generates Answers - Belong.Life. [cited 2025 Apr 22]. https://belong.life/info_pages/how-dave-the-ai-cancer-mentor-generates-answers/
- **64.** Haque MDR, Rubya S. An Overview of Chatbot-Based Mobile Mental Health Apps: Insights From App Description and User Reviews. *JMIR Mhealth Uhealth.* 2023;11:e44838. doi: 10.2196/44838
- **65.** Malik T, Ambrose AJ, Sinha C. Evaluating User Feedback for an Artificial Intelligence-Enabled, Cognitive Behavioral Therapy-Based Mental Health App (Wysa): Qualitative Thematic Analysis. *JMIR Hum Factors.* 2022;9(2). doi: 10.2196/35668
- **66.** Chang CL, Sinha C, Roy M, Wong JCM. AI-Led Mental Health Support (Wysa) for Health Care Workers During COVID-19: Service Evaluation. *JMIR Form Res.* 2024;8. doi: 10.2196/51858

- **67.** Durden E, Pirner MC, Rapoport SJ, Williams A, Robinson A, Forman-Hoffman VL. Changes in stress, burn-out, and resilience associated with an 8-week intervention with relational agent “Woebot.” *Internet Interv.* 2023 Sep 1;33:100637. doi: 10.1016/J.INVENT.2023.100637.
- **68.** Fitzpatrick KK, Darcy A, Vierhile M. Delivering Cognitive Behavior Therapy to Young Adults With Symptoms of Depression and Anxiety Using a Fully Automated Conversational Agent (Woebot): A Randomized Controlled Trial. *JMIR Ment Health.* 2017;4(2). doi: 10.2196/MENTAL.7785
- **69.** Wysa Receives FDA Breakthrough Device Designation for AI-led Mental Health Conversational Agent. [cited 2025 Apr 20]. <https://blogs.wysa.io/blog/research/wysa-receives-fda-breakthrough-device-designation-for-ai-led-mental-health-conversational-agent>
- **70.** Barreda M, Cantarero-Prieto D, Coca D, Delgado A, Lanza-León P, Lera J, et al. Transforming healthcare with chatbots: Uses and applications—A scoping review. *Digit Health.* 2025;11:20552076251319176. doi: 10.1177/20552076251319174.
- **71.** Singh B, Olds T, Brinsley J, Dumuid D, Virgara R, Matricciani L, et al. Systematic review and meta-analysis of the effectiveness of chatbots on lifestyle behaviours. *npj Digital Medicine* 2023;6(1):1–10. doi: 10.1038/s41746-023-00856-1.
- **72.** Ada Health. [cited 2025 Apr 20]. <https://ada.com/es/>
- **73.** Symptom Checker - WebMD. [cited 2025 Apr 20]. <https://symptoms.webmd.com/>
- **74.** Buoy Health. [cited 2025 Apr 21]. <https://www.buoyhealth.com/>
- **75.** Gilbert S, Mehl A, Baluch A, Cawley C, Challiner J, Fraser H, et al. How accurate are digital symptom assessment apps for suggesting conditions and urgency advice? A clinical vignettes comparison to GPs. *BMJ Open.* 2020;10(12). doi: 10.1136/BMJOPEN-2020-040269
- **76.** Healthify - AI health coaching. [cited 2025 Apr 20]. <https://openai.com/index/healthify/>
- **77.** Cosentino J, Belyaeva A, Liu X, Furlotte NA, Yang Z, Lee C, et al. Towards a Personal Health Large Language Model. 2024. <https://arxiv.org/abs/2406.06474v1>
- **78.** Siddals S, Torous J, Coxon A. “It happened to be the perfect thing”: experiences of generative AI chatbots for mental health. *npj Mental Health Research* 2024 3:1. 2024;3(1):1–9. doi: 10.1038/s44184-024-00097-4
- **79.** Heinz M V., Mackin DM, Trudeau BM, Bhattacharya S, Wang Y, Banta HA, et al. Randomized Trial of a Generative AI Chatbot for Mental Health Treatment. *NEJM AI.* 2025;2(4). doi: 10.1056/AIOA2400802
- **80.** Aydin S, Karabacak M, Vlachos V, Margetis K. Large language models in patient education: a scoping review of applications in medicine. *Front Med (Lausanne).* 2024;11:1477898. doi: 10.3389/FMED.2024.1477898
- **81.** Fraser H, Crossland D, Bacher I, Ranney M, Madsen T, Hilliard R. Comparison of Diagnostic and Triage Accuracy of Ada Health and WebMD Symptom Checkers, ChatGPT, and Physicians for Patients in an Emergency Department: Clinical Data Analysis Study. *JMIR Mhealth Uhealth.* 2023;11(1). doi: 10.2196/49995
- **82.** Gao Y, Xiong Y, Gao X, Jia K, Pan J, Bi Y, et al. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. [cited 2025 Apr 24]; <https://arxiv.org/abs/2312.10997>
- **83.** Evaluate healthcare generative AI applications using LLM-as-a-judge on AWS. [cited 2025 Apr 24]. <https://aws.amazon.com/es/blogs/machine-learning/evaluate-healthcare-generative-ai-applications-using-llm-as-a-judge-on-aws/>
- **84.** Organización Mundial de la Salud. Ética y gobernanza de la Inteligencia Artificial en el ámbito de la salud: orientaciones de la OMS. 2021 [cited 2025 Apr 22];1–10. <https://www.who.int/es/publications/item/9789240037403>.
- **85.** Ethics guidelines for trustworthy AI | Shaping Europe’s digital future. [cited 2025 Apr 11]. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>
- **86.** Transparency for Machine Learning-Enabled Medical Devices: Guiding Principles | FDA. [cited 2025 Apr 6]. <https://www.fda.gov/medical-devices/software-medical-device-samd/transparency-machine-learning-enabled-medical-devices-guiding-principles>
- **87.** EU Artificial Intelligence Act | Up-to-date developments and analyses of the EU AI Act. [cited 2025 Apr 21]. <https://artificialintelligenceact.eu/>
- **88.** ICHOM: Patient-centred outcomes through value-based healthcare. [cited 2025 Apr 21]. <https://www.ichom.org/>
- **89.** Digital Technology Assessment Criteria (DTAC) - Key tools and information - NHS Transformation Directorate. [cited 2025 Apr 21]. <https://transform.england.nhs.uk/key-tools-and-info/digital-technology-assessment-criteria-dtac/>
- **90.** Osama M, Ateya AA, Sayed MS, Hammad M, Pławiak P, Abd El-Latif AA, et al. Internet of Medical Things and Healthcare 4.0: Trends, Requirements, Challenges, and Research Directions. *Sensors* 2023;23(17):7435. doi: 10.3390/S23177435
- **91.** Awad AI, Fouda MM, Khashaba MM, Mohamed ER, Hosny KM. Utilization of mobile edge computing on the Internet of Medical Things: A survey. *ICT Express.* 2023;9(3):473–85. doi: 10.1016/J.ICTE.2022.05.006



5. CONCLUSIONES

La IA está transformando rápidamente la práctica de la medicina moderna, ofreciendo soluciones innovadoras que prometen mejorar la forma en que se brinda y experimenta la atención médica. Su creciente uso está revolucionando la medicina al mejorar el diagnóstico, el tratamiento y la atención al paciente, a la vez que está contribuyendo a reducir los costes y a aumentar la eficiencia de los procesos clínicos.

La IA es hoy esencial en las tecnologías sanitarias al contribuir a automatizar tareas repetitivas, facilitar la detección temprana de enfermedades, mejorar la capacidad del diagnóstico y la eficacia de los tratamientos, ayudar en la toma de decisiones clínicas, complementar la experiencia formativa de los profesionales, reducir los tiempos de investigación y optimizar costes, y en definitiva aumentar la calidad de vida de los pacientes, mejorando su grado de adhesión a tratamientos.

En este capítulo hemos centrado el análisis del impacto de la IA en tres tecnologías sanitarias: las imágenes médicas, la robótica y la salud móvil en la medicina cada vez más personalizada.

Las imágenes médicas revolucionaron la práctica clínica en el siglo pasado y hoy en día siguen siendo una tecnología imprescindible en multitud de áreas clínicas. La IA está contribuyendo a mejorar la calidad de las imágenes durante su adquisición, reduciendo el ruido y optimizando la resolución en tiempo real. Además, está consiguiendo ajustar automáticamente parámetros como la dosis de radiación y mejora la reconstrucción de imágenes, reduciendo tiempos de adquisición y optimizando el flujo de trabajo.

La robótica en medicina está hoy presente en áreas tan relevantes como la cirugía o la rehabilitación. Si nos centramos en la primera área, la cirugía asistida por robots ha revolucionado la forma de realizar las cirugías porque las plataformas quirúrgicas robóticas son entornos tecnológicos muy avanzados que integran de forma muy directa los modelos de IA para mejorar aún más las capacidades quirúrgicas. Los modelos de IA se están utilizando para automatizar las tareas quirúrgicas y mejorar la seguridad intraoperatoria. La IA también se está utilizando para mejorar el campo de la educación quirúrgica a través de herramientas automatizadas de evaluación

de habilidades y entrega de retroalimentación intraoperatoria. La IA quirúrgica robótica también plantea cuestiones éticas complejas que se están abordando y debatiendo a medida que se presentan más innovaciones. La implementación de la IA en la cirugía robótica se está expandiendo rápidamente y en el futuro próximo veremos avances cada vez más extraordinarios.

En la búsqueda de una medicina más personalizada, la IA está mejorando la accesibilidad a los servicios de atención médica, particularmente en áreas remotas y con recursos limitados. Las aplicaciones móviles de salud están a la vanguardia de esta transformación, llevando las capacidades de diagnóstico directamente a las manos de los usuarios, y especialmente en la gestión de las enfermedades crónicas. Esta integración de la IA en la salud móvil abre una nueva era de atención personalizada y eficiente, fundamental ante la creciente demanda de servicios de salud y la limitación de recursos sanitarios, ofreciendo nuevos servicios de salud mediante planes de tratamiento personalizados, monitorización en tiempo real, análisis predictivo y asistentes virtuales. Los dispositivos portátiles y sensores integrados con aplicaciones de salud móvil permiten la recopilación continua de datos sobre diversos parámetros de salud. Los algoritmos de IA procesan estos datos en tiempo real para detectar anomalías y generar alertas para pacientes y profesionales sanitarios. Esta monitorización continua permite intervenciones oportunas y ajustes en los planes de tratamiento, lo que potencialmente previene episodios agudos o complicaciones de enfermedades crónicas. Los asistentes virtuales de salud son una tecnología nueva e innovadora que está transformando la industria de la salud para apoyar a los profesionales de la salud. Están diseñados para simular conversaciones humanas y ofrecer atención personalizada al paciente según sus comentarios. Estos asistentes digitales utilizan aplicaciones basadas en IA, chatbots, sonidos e interfaces. Los asistentes virtuales pueden ayudar a los pacientes con tareas como identificar el problema subyacente según sus síntomas, brindar asesoramiento médico, recordarles que tomen sus medicamentos, programar citas médicas y monitorear los signos vitales. Además, pueden recopilar información diaria sobre la salud de los pacientes y enviar los informes al médico asignado. Al liberar a los profesionales de la salud de algunas de estas responsabilidades, los asistentes virtuales pueden ayudar a reducir su carga de trabajo y mejorar los resultados de los pacientes.





La implantación de la IA en las tecnologías sanitarias también está enfrentando nuevos retos relacionados con cuestiones éticas, la seguridad de los datos y el papel de la experiencia humana a medida que la IA siga evolucionando en la atención médica. Una de las principales preocupaciones éticas es la posibilidad de que la IA perpetúe y amplifique los sesgos presentes en los datos de entrenamiento. Los algoritmos de IA aprenden de los datos con los que se alimentan. Por lo tanto, si estos datos reflejan sesgos históricos o sociales, o excluyen poblaciones demográficas relevantes, los modelos resultantes pueden discriminar a ciertos grupos. Esto es particularmente preocupante cuando se trata de comunidades ya desatendidas, ya que estos sesgos podrían reforzar las disparidades de salud sistémicas y globales. Con el aumento de la adopción de la detección pasiva a través de tecnologías altamente accesibles, como los dispositivos portátiles, los desarrolladores tienen un mayor acceso a grandes volúmenes de datos de alta fidelidad, personalizados y longitudinales, que se pueden caracterizar a nivel individual y agregar a lo largo del tiempo. El uso estratégico de estos datos durante el entrenamiento de la IA tiene un gran potencial para minimizar los sesgos injustos. Los modelos de IA deben probarse en diferentes entornos y subgrupos para garantizar su fiabilidad, generalización y rendimiento coherente.

Otro desafío importante es la falta de transparencia en modelos complejos de IA. Estos sistemas de “caja negra” pueden ser difíciles de entender, lo que limita la confianza entre los médicos y los pacientes que no pueden discernir cómo se toman las decisiones. Se hace imprescindible centrarse en crear técnicas de IA explicables que hagan que los procesos de toma de decisiones de la IA sean más transparentes. Por ejemplo, proporcionar visualizaciones fáciles de usar de los resultados generados por IA permite a los médicos confiar y utilizar las herramientas de IA de forma adecuada en sus flujos de trabajo.

La transformación tecnológica de la sanidad, apoyada por la IA, está delineando una nueva forma de entender la atención médica. Afrontar esta profunda transformación solo puede abordarse desde la creación de equipos multidisciplinares en los que los ingenieros biomédicos y los profesionales sanitarios consideren de manera proactiva cómo diseñarla, entrenarla e implementarla de manera ética, transparente y accesible. En este nuevo paradigma clínico será fundamental asegurar que las tecnologías sanitarias basadas en IA se diseñen e implementen con una protección sin concesiones del consentimiento del paciente, la privacidad, la seguridad y la ciberseguridad.

INFORME I

LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

IV. Tecnología sanitaria y Humanización. Perspectivas.

IV.

Tecnología sanitaria
y Humanización.
Perspectivas.

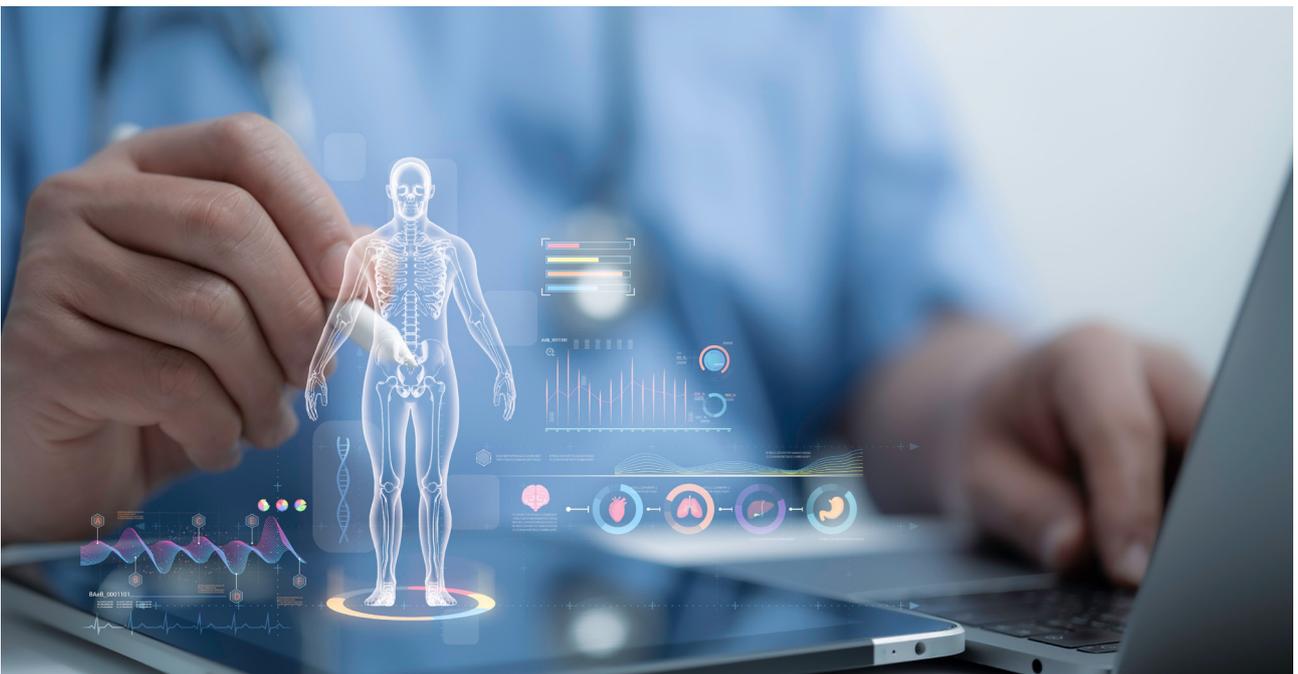
IV.

Tecnología sanitaria y Humanización. Perspectivas.

Leídos los capítulos anteriores se evidencia la importancia y fundamento de las tecnologías sanitarias para el desarrollo de la medicina, las ciencias de la salud y la asistencia sanitaria de nuestro tiempo. Las experiencias que se recogen en los capítulos II y III son un estímulo y hacen necesario comentar las perspectivas de futuro, entendido el término como punto de vista, panorámica, punto de visión o enfoque, pues de ellas se pueden derivar motivaciones para la reflexión sobre las oportunidades y riesgos que la tecnología sanitaria nos depara, en nuestro caso la Digitalización y la Inteligencia Artificial aplicadas a la salud, mejor aún, a la asistencia sanitaria.

PERSPECTIVA 1

Las tecnologías son el agua de nuestra “*pecera existencial*”, nos rodean cada día, somos “*seres tecnológicos*”. Vivimos en un mundo y una sociedad hiperconectada, la quinta generación de redes móviles, 5G, nos permitirá navegar a una velocidad 10 veces más rápido que con la fibra óptica actual y alcanzaremos 10 GBytes por segundo. El tiempo de latencia en la red o tiempo de respuesta será de 5 milisegundos. Será posible un estado de conectividad, “*todo el día y con todo*” en un tiempo ínfimo, instantáneo, que hemos denominado trabajar a “*tiempo real*”. Serán posibles las intervenciones quirúrgicas teleasistidas, realizar cirugía remota,



digital o cognitiva, cirugía 4.0. El Foro Económico Mundial de 2016 confirmó estar en la cuarta revolución industrial que resulta de la convergencia de tecnologías digitales, físicas y biológicas que permiten la automatización y la producción, de forma cuasi-independiente de la actividad humana. Mediante las tecnologías de la información las imágenes recorren el mundo por las redes sociales, todo es “visitable” sin moverse de casa y las nuevas generaciones se cultivan y culturizan en un entorno de hiperconectividad.

Usuarios a una distancia cada vez más corta, el abanico va desde el uso del teléfono móvil o el ordenador portátil a los dispositivos que cuidan nuestra salud, interactúan con nosotros de forma continua, los dispositivos “wearables”, que pueden controlar nuestra saturación de oxígeno, presión arterial, frecuencia cardiaca, consumo de calorías y otras variables fisiológicas, incluso los niveles de diferentes analitos o de fármacos terapéuticos. Informaciones que se integran en “la nube” y el “portal del paciente”, aportando una mejor disponibilidad, eficacia y eficiencia en el cuidado de nuestra salud. A través de la videoconsulta podemos recibir el resultado de la Resonancia Nuclear Magnética y descartar los peores presagios, aceptando a su vez una nueva forma de relación médico-paciente, novedosa relación clínica que deberemos aprender a gestionar e integrar en un modelo innovador de la cultura sanitaria. En el ámbito de la investigación, las nuevas tecnologías GPS, el láser o la fibra óptica son solo un inicio de lo que nos queda por conocer gracias al desarrollo de la tecnología cuántica y sus aplicaciones en el cuidado de la salud. Vivimos el tiempo de la tecnología y la tecnologización de la vida, que nos exige una “formación continua”, un nuevo estado de alfabetización, para estar a la altura de los acontecimientos sociales y sanitarios, pues las humanidades y la investigación científica, en el área de las ciencias de salud, deben ser una propuesta necesaria.

Los profesionales de la salud encuentran en las tecnologías sanitarias las mejores soluciones para obtener el mejor cuidado de un paciente, su diagnóstico y curación, a la vez que se alimenta el debate ético, preocupación axiológica, sobre si las tecnologías sanitarias deben ser medios o fines, para lo que es imprescindible recuperar, rehabilitar y actualizar los conceptos vinculados a los fines de la medicina y las profesiones sanitarias, a fin de hacer posible ejercer una asistencia sanitaria humanizada, incorporando el concepto de “humanización

tecnológica”. La experiencia de la pandemia por COVID-19, aceleró gran cantidad de usos y procesos tecnológicos con gran éxito, pero también puso en evidencia debilidades vinculadas a la gobernanza, el liderazgo y la toma de decisiones, cuyo aprendizaje se está transformando en nuevas oportunidades para la innovación de las tecnologías sanitarias.

En el ámbito de la salud venimos transitando varias décadas en compañía de tecnologías que adquieren una dimensión y robustez insospechada, casi increíble, capaz de curar y cuidar, desde la robótica, la predicción diagnóstica, la Inteligencia Artificial, la nanotecnología o la biopatología molecular, incluso se nos insinúa el nuevo estatus de la transhumanización. Estamos delante de una fuerza, la tecnología sanitaria, que nos coloca ante un cambio de paradigma, cambio de época, de forma de vivir, que afecta y modifica los conceptos y criterios sobre la salud y la enfermedad.

La contrapartida, la cara oculta, de esa fuerza tecnológica también existe y nos muestra, entre otros problemas, los nuevos caminos de la inequidad. Así lo refiere Mikele K. Evans: *“el estado de la equidad en salud puede definirse... como la ausencia de diferencias evitables entre grupos socioeconómicos, demográficos o áreas geográficas acerca del estado de salud y sus resultados... La equidad en salud existe... cuando todos pueden estar lo más saludables posible sin reducir los medios para lograr este objetivo”*. La inequidad está presente cuando detectamos desigualdades injustas, innecesarias y evitables.

Tecnología, Salud y Humanización, son las palabras clave, que enmarcan las políticas de salud de nuestro tiempo y nos permiten construir un lenguaje cultural capaz de narrar sus avances, éxitos y limitaciones. Las políticas de salud permiten dibujar el mapa que entregamos a las nuevas generaciones, reflejan nuestra visión y misión no solo desde el cuidar y el curar, sino también en relación con el sentido de la vida y los valores sociales. Es por ello que los profesionales de la salud deben transmitir su compromiso y testimonio a las nuevas generaciones, pues son “una nueva oportunidad”, un manejo de posibilidades, que se reconoce heredero, nunca dueño, de lo recibido.

“El hecho de que nos consideren mejor de lo que somos nos obliga a serlo”. J. Benavente.



PERSPECTIVA 2

“Las rayas fronterizas del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio”. Gregorio Marañón

Durante el siglo XX la dicotomía entre hechos y valores se difumina con la llegada de la tecnociencia y la ética científica, pues los paradigmas científicos no pueden ser axiológicamente neutros. Las teorías científicas deben tener los valores de la precisión, coherencia, generalidad, simplicidad, fecundidad y utilidad. Hemos podido comprobar en los capítulos anteriores, sobre digitalización e Inteligencia Artificial, que la actividad científica en medicina y las ciencias de la salud se desarrolla no solo desde los valores puros de la ciencia más ortodoxa, sino que se incorporan criterios económicos, políticos, jurídicos, sociales y ecológicos, entre otros.

Nos encontramos hoy en la ciencia y la investigación “postacadémica”, basada en la responsabilidad y el trabajo en equipo, como refiere John Ziman: *“la ciencia no es el modo de entender las cosas, único y privilegiado, que es superior a los demás. No se basa en fundamentos más firmes o profundos que cualquier otro método de cognición humano. El conocimiento científico no es una metanarración universal a partir de la cual se podía esperar poder deducir, a la larga, una respuesta fiable a cualquier cuestión significativa sobre el mundo. No es objetivo sino reflexivo: la interacción entre quien conoce y lo que se conoce es un elemento esencial del conocimiento. Y como cualquier otro producto humano, no está libre de valores, sino que los intereses sociales lo impregnan”*. En este mismo sentido se expresa la profesora Sara Bandrés: *“la biología sintética, la ingeniería genética, la biotecnología y nanotecnología abogan, sin duda alguna, la evolución del conocimiento médico y de la medicina, pero su adelanto despliega la ambición de la ciencia que desafía realidades impensables e increíbles... Realidades posibles que plantean conflictos éticos y jurídicos atrapados en un laberinto sin más salida que la de seguir el frágil hilo de la precaución. El éxito y la falta de trabas no están garantizados, pero, la precaución, intenta permanecer con criterios de medida y confianza ante la concurrencia de una duda, con el fin de combatir los monstruos de la razón”*.

Nos puede servir como ejemplo la experiencia publicada por la Dra. Curry et al. en 2025 acerca de la

detección de la trombosis venosa profunda proximal (TVP) mediante IA. La ecografía es una de las técnicas de diagnóstico por imagen más solicitadas. El coste anual del diagnóstico de trombosis venosa profunda (TVP) en el Reino Unido asciende a 175 millones de libras. En al menos el 80 % de los casos, se descarta la TVP. La exigible gestión y optimización de recursos también está vinculada a la precisión de las pruebas, en este caso diseñadas para evaluar si un dispositivo de software guiado por Inteligencia Artificial (IA) podría ayudar a especialistas no radiólogos a diagnosticar la TVP proximal. Aunque la ecografía guiada por IA puede detectar la TVP proximal, la precisión de la prueba no fue suficiente para garantizar la seguridad del dispositivo. Tras la investigación correspondiente se concluyó, aplicando criterios de prudencia, la necesidad de una mayor optimización del software antes de su uso en la práctica clínica por parte de profesionales de la salud sin formación en radiología.

Otro ejemplo, más general, se relaciona con la hipótesis sobre las posibles aplicaciones que nos pueden aportar los avances de la nanotecnología, la biología sintética y la biocomputación que, potencialmente, podrían hacer posible crear estructuras celulares capaces de actuar como ordenadores dentro de nuestras células, lo que permitiría tratar enfermedades metabólicas o diagnosticar enfermedades.

Desde el punto de vista ético y moral nos preguntamos: ¿cuáles son las repercusiones de las nuevas tecnologías sobre la vida presente y futura de los humanos? Sabemos que la conectividad y la tecnociencia no solo afectan a las relaciones humanas sino también a la percepción y funcionamiento de nuestro cuerpo. Vivimos fusionados con artefactos y sistemas técnicos al punto de que, su autonomía, puede determinar decisiones sin nuestra intervención directa, incluso nos podríamos relacionar con los demás a través de un nuevo “yo digital”.

Ante todo ello la ética aplicada en el marco de las nuevas tecnologías adquiere una nueva dimensión, pues no es solo una cuestión de personas sino también de las instituciones y nos preguntamos si es necesario considerar que estamos en el tiempo de una nueva ética aplicada, la tecnoética, entendida como ámbito de reflexión sobre derechos y deberes, propio de una mutación cultural, especialmente en el ámbito de la medicina y las ciencias de la salud.



Aceptamos con G. Marfany¹ que: *“No hay fronteras entre ciencias experimentales, sociales o humanidades, sino preguntas que deben acometerse mediante un abordaje interdisciplinar, bioéticos, científicos, médicos y legisladores. Ciertamente de su respuesta depende nuestro futuro y el de nuestra sociedad”*.

PERSPECTIVA 3

“Sin la técnica el hombre no existiría ni habría existido nunca”. José Ortega y Gasset

La Asamblea Mundial de la Salud consideró en 2005 mediante su resolución WHA58.28 la existencia de una CiberSalud, al punto de instar a los estados miembros a considerar la posibilidad de elaborar un plan estratégico para: *“implementar los servicios de salud electrónica y desarrollar la infraestructura de tecnologías de la información y la comunicación para la salud”*.

El sector de la sanidad será uno de los que alcanzarán mayor desarrollo tecnológico, detrás del de la seguridad, y por delante de sectores financieros, industriales y educativos. Las aplicaciones de la digitalización y la Inteligencia Artificial se traducirán también en mejoras significativas en la atención al paciente, en todas sus formas, hospitalaria y extrahospitalaria, así como potenciador de la innovación. Digitalización, virtualización, robótica, gestión de dispositivos o ciberseguridad, serán los nuevos conceptos que determinen la nueva gestión clínica del paciente.

Aceptamos que la digitalización y la IA son las tecnologías más importantes y disruptivas de los últimos 30 años y que serán de gran impacto en la asistencia sanitaria y la economía de la salud del futuro. La transformación digital en salud implica la integración de la tecnología en todas las áreas de la organización sanitaria, es una nueva forma de operar y aportar valor al acto sanitario, sabiendo que la transformación digital en salud va más allá de la mera digitalización de los procesos internos de las organizaciones sanitarias; es una nueva forma de pensar, de actuar y de relacionarse, tiene la capacidad de ofrecer nuevos servicios digitales a los usuarios e incorporar nuevas propuestas a la asistencia sanitaria basada en valor.

La salud digital será un factor determinante para garantizar la cobertura universal, la protección y el cuidado de la salud y los determinantes digitales de la salud serán

complementos fundamentales de los determinantes sociales de la salud, pero también pueden poner de manifiesto nuevos factores de desigualdad si no afrontamos los riesgos de la brecha digital. La anatomía del trabajo sanitario será multidisciplinar, cambiará la jerarquización de responsabilidades profesionales y los modelos de atención sanitaria, lo que exigirá una mayor alfabetización tecnológica de los equipos profesionales, que se extenderá desde la atención hospitalaria de pacientes agudos al marco de la cronicidad y el autocuidado. Nos puede servir como ejemplo paradigmático la evolución extraordinaria de las tecnologías sanitarias de *point of care*.

Sabemos que la transformación digital en salud también ha puesto de manifiesto el riesgo de que existan bajos niveles de alfabetización en ciertas poblaciones de pacientes, en particular en aquellos con poca exposición a la tecnología, lo que podría generar desconfianza y dificultar la adopción e incorporación de las innovaciones tecnológicas. Será imprescindible desarrollar estrategias formativas para apoyar y acompañar a los pacientes en su experiencia digital, facilitar el acceso y brindar educación actualizada para mejorar la atención clínica, reducir la brecha digital y las desigualdades en salud.

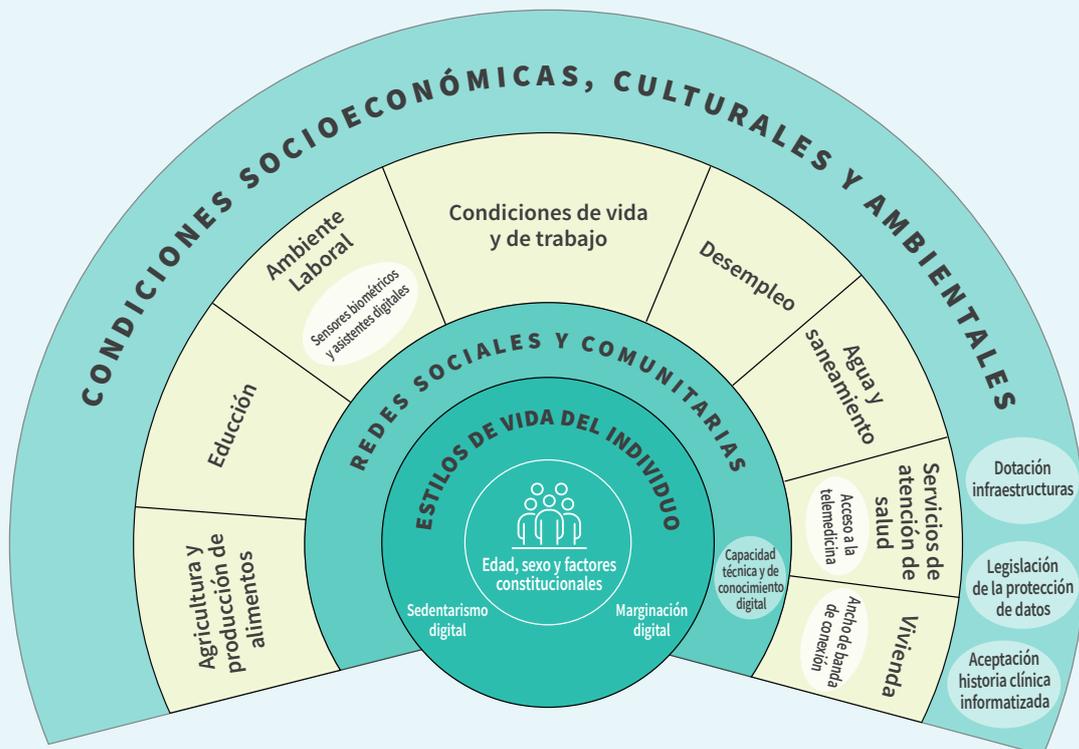
El uso efectivo de los dispositivos portátiles que se refieren en el presente trabajo puede registrar datos conductuales o fisiológicos para su uso en la toma de decisiones médicas sobre el usuario. Por lo tanto, resulta imprescindible abordar la propiedad de los datos, el derecho de control y acceso, adquirir alfabetización y ganar confianza en los sistemas de gestión de la información, lo que exige establecer estándares de datos e interoperabilidad para utilizarlos de manera consistente.

Si los pacientes se sienten empoderados por el uso de los dispositivos portátiles, cobrará más sentido y eficacia el concepto del autocuidado.

Los programas de educación y capacitación para mejorar la alfabetización digital no se refieren solo a los pacientes sino también a los equipos de profesionales de la salud en sus diferentes ámbitos asistenciales, pues la brecha digital implica no solo un acceso desigual a la tecnología y a la conectividad, sino que también afecta a la gestión clínica del paciente en todas sus dimensiones, lo que exige de la colaboración entre los sectores público y privado así como alianzas estratégicas entre los sistemas de atención médica y los fabricantes.



MODELO DE LOS DETERMINANTES SOCIALES DE LA SALUD DE DAHLGREN Y WHITEHEAD



Tomado de Vidal-Alaball *et al. Atención Primaria*, 55 (2023), 102626

El temor a que los datos personales de salud se vean comprometidos o se utilicen indebidamente, es uno de los principales problemas de confianza. Los profesionales sanitarios deben conocer los protocolos de seguridad de datos implementados en sus instituciones e idealmente deberían poder comunicar a sus pacientes cómo se utilizan, almacenan y comparten sus datos. Será necesario desarrollar y gestionar una gobernanza del dato tecnológico sanitario con aplicaciones en el diagnóstico, tratamiento e investigación, pues afectará no solo a la *compliance* legal sino también a la ciberseguridad, los procesos de innovación y los modelos de negocio sanitario, en virtud de la corresponsabilidad de las empresas, fabricantes, proveedores, distribuidores y responsables asistenciales.

En los sistemas de salud modernos prima la promoción y prevención, la excelencia clínica, la seguridad y la eficiencia junto con la transferencia de conocimiento, por ello la transformación digital se constituye en tres niveles: estratégico, ejecutivo y tecnológico que afectarán:

1.- A la Historia de Salud Digital (HSD), basada en la identidad digital única, interoperable y a la gestión del dato sanitario, no solo para su uso de forma descriptiva sino integrada, para que permita construir modelos predictivos y anticiparse a algunas circunstancias. Hay que desarrollar criterios de calidad y gobernanza de los datos.

2.- A la organización interna de la sanidad, con un modelo operativo en el que los usuarios sean el objetivo fundamental y los destinatarios de los servicios, mediante canales de comunicación fiables y disponibles en tiempo real. Desarrollar códigos de conducta y buenas prácticas que permitan la trazabilidad de los procesos y establecer una adecuada jerarquía de responsabilidades en toda la cadena de valor. Disponer de criterios técnicos objetivos de precisión, solidez, ciberseguridad y gestión de la calidad documentada con procedimientos normalizados, evolución y gestión de los riesgos.

3.- A promover y desarrollar, respecto de los usuarios, profesionales y pacientes, la transparencia, aplicabilidad, competencia y confidencialidad que permitan el uso de estas tecnologías de manera confiable.

“El acto sanitario tecnologizado sigue siendo un lugar de encuentro entre la confianza de quien lo recibe y la conciencia de quienes lo ejercen”. F. Bandrés

PERSPECTIVA 4

“¿Dónde está la sabiduría que hemos perdido con el conocimiento? ¿Dónde está el conocimiento que hemos perdido con la información?” T. S. Eliot.

Los avances tecnológicos han cambiado nuestra perspectiva: las máquinas superaron a los humanos en tareas antes consideradas signos de inteligencia, como memorizar datos o jugar al ajedrez, redirigiendo nuestro enfoque a la creatividad o el lenguaje.

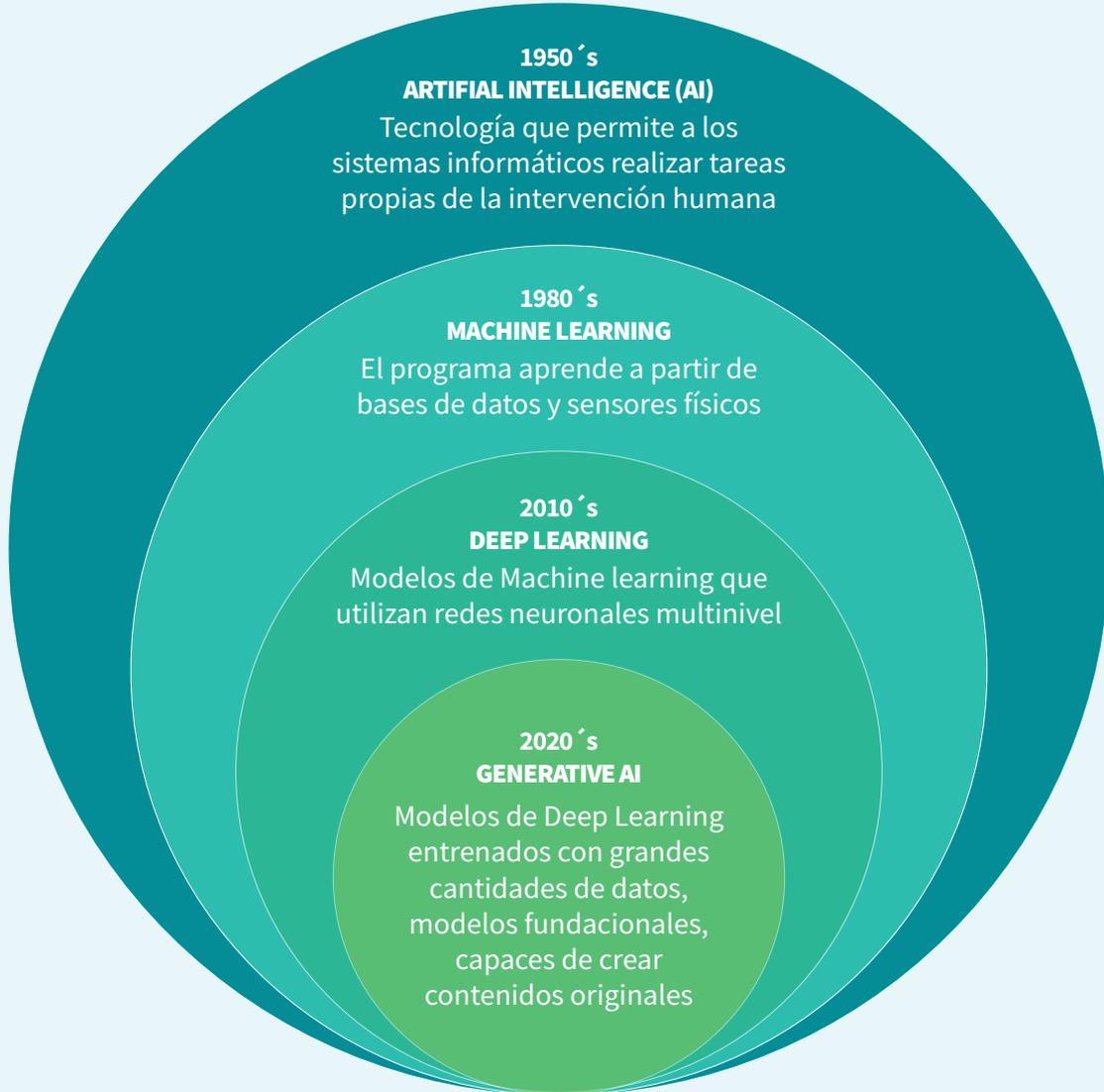
La IA abarca una realidad muy compleja, es un término que se remonta al año 1956 en el que el profesor de matemáticas de la Universidad de Dartmouth (Estados Unidos) John McCarthy utiliza la expresión Inteligencia Artificial, en lugar de las usadas hasta el momento, como eran la de “*simulación por ordenador*”, o “*inteligencia de las máquinas*”. En ningún caso se pensaba que la IA era capaz de reproducir la inteligencia humana, se consideraba que eso era la “falacia de la IA”. La IA se caracteriza por ser capaz de aprender y razonar, en el primer caso a través de la estadística, manejo de grandes volúmenes de datos, redes neuronales y un razonamiento que se apoya en las leyes de la lógica, el álgebra de Boole y los modelos algorítmicos. De esta manera podemos diferenciar la Inteligencia Artificial general, capaz de imitar todas las capacidades de la inteligencia humana por muy complicadas o heterogéneas que sean; planificar, aprender, capacidad de abstracción y ser capaz de generalizar, que será lo que denominamos Superinteligencia Artificial, que, por el momento, no existe.

En el otro lado están las llamadas “Inteligencias Artificiales específicas” capaces de resolver actividades concretas de manera satisfactoria, capaces de mejorar y crecer si interactúan con otras inteligencias, un proceso de agregación que resuelve tareas de mayor complejidad.

La IA es un área de conocimiento multidisciplinar que se desarrolla en el marco de dos paradigmas fundamentales: la Inteligencia Artificial simbólica y la conexionista. Estamos delante de una rama de las ciencias de la computación que diseña herramientas informáticas capaces de simular procesos de la inteligencia humana



ETAPAS DEL DESARROLLO DE LA IA Y FAMILIAS TECNOLÓGICAS



como son el aprendizaje, el razonamiento y la autocorrección; es un acercamiento interdisciplinar a la comprensión, el modelado y la reproducción de los procesos inteligentes y cognitivos a partir de diversos principios y dispositivos computacionales, matemáticos, lógicos, mecánicos y biológicos. Hemos visto en el capítulo III cómo es capaz de emular la inteligencia humana a través de algoritmos y herramientas computacionales para obtener sistemas que generan conocimiento (com-

portamiento inteligente) de manera autónoma y a partir del análisis de gran cantidad de datos (*big data*), lo que permite elaborar algoritmos capaces de identificar la predisposición a padecer ciertas enfermedades, o establecer predicciones sobre su evolución y pronóstico, capaces de sustituir a la inteligencia humana en la toma de decisiones diagnósticas y terapéuticas. También se espera que el desarrollo de la Inteligencia Artificial permita ampliar y mejorar el autocuidado de las personas

“La IA puede mejorar la capacidad de anticipación y preparación ante emergencias sanitarias, así como mejorar el diagnóstico, autocuidado del paciente, monitorización, prevención temprana y los sistemas de apoyo a la decisión clínica “

con enfermedades crónicas, la investigación traslacional, la gestión eficiente de los sistemas sanitarios y la economía de la salud.

La Inteligencia Artificial, aunque parezca reciente, no es un concepto nuevo. En la década de los 70 del pasado siglo se creó el sistema MYCIN, capaz de seleccionar pautas antibióticas para tratar la septicemia con mayor acierto que lo que podían hacer los médicos clínicos. MYCIN nunca llegó a implementarse de forma generalizada, evidenciando que el mayor desafío de la Inteligencia Artificial no es su desarrollo, sino su integración en la práctica clínica real.

Durante décadas el procesamiento del lenguaje natural aplicado a la medicina fue un área de interés principalmente académico, hasta que en 2017 investigadores de Google presentaron el *transformer*, una red neuronal diseñada para la traducción automática, con una gran precisión. A diferencia de los modelos tradicionales de aprendizaje automático, que requerían datos específicos para cada tarea, los grandes modelos de lenguaje (LLM) se entrenan mediante arquitecturas neuronales *transformer* a partir de textos ya existentes en Internet². Algunos expertos afirman que pueden realizar razonamientos clínicos complejos, mientras que otros los ven como simples “loros estocásticos” sin capacidad de comprensión. Si un sistema actúa “como si” razonara, podríamos considerarlo inteligente, dejando su naturaleza interna como una cuestión filosófica. Desgraciadamente, determinar si algo actúa inteligentemente exige definir qué significa inteligencia.

En el ámbito clínico, los LLM nos hacen replantearnos la naturaleza del acto médico. Así como Internet redujo la asimetría de información entre médicos y pacientes, estas herramientas podrían transformar el rol del médico al ser capaces de sustituirle en tareas cog-

nitivas complejas, como explicar conceptos médicos de forma adaptada al nivel educativo del paciente. Debemos ser cautos al evaluar el impacto de los LLM en medicina y en atención primaria³. No olvidemos que el uso de LLM plantea riesgos significativos, como sus “alucinaciones” o confabulaciones y respuestas incorrectas que parecen ciertas.

Resulta fundamental liderar el diálogo público para garantizar que estas tecnologías respondan a las necesidades reales de pacientes y profesionales sanitarios. La integración de los LLM debe hacerse con inteligencia, respetando la complejidad y particularidades de la atención sanitaria, reconociendo las fortalezas y desafíos diferenciales de cada ámbito asistencial.

La expectativa profesional y social de la IA en el mundo es que produzca un salto cualitativo en el cuidado de la salud. Entre otros, tiene el potencial de contribuir a reducir la variabilidad de la asistencia sanitaria entre regiones o países; puede mejorar la capacidad de anticipación y preparación ante emergencias sanitarias, así como mejorar el diagnóstico, autocuidado del paciente, monitorización, prevención temprana y los sistemas de apoyo a la decisión clínica. Su potencial llegará más lejos en sus aplicaciones, como en el ámbito de la investigación biomédica y clínica y en la gestión de actividades logísticas y administrativas. De nuevos es evidente que el uso y nuevas aplicaciones implica una compleja formación y adaptación profesional que requiere de la colaboración interdisciplinar desde diferentes áreas de conocimiento como son la investigación, industria, hospitales, sector sanitario, regulación, evaluación y legislación. Es imprescindible la disponibilidad de datos de calidad e interoperables para desarrollar ciertas aplicaciones de IA. El valor de los datos sanitarios es un potencial todavía infrautilizado.



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Amenazas persistentes avanzadas (APT)	<p>Se trata de una metodología de ataque creada y definida específicamente para atacar a una empresa o gobierno concretos con un objetivo definido. Para ello, se utilizan técnicas de ciberataque e infiltración continuas, clandestinas y avanzadas para acceder a un sistema y permanecer oculto durante un notable periodo de tiempo, conocerlo en detalle, adquirir privilegios del sistema y eliminar evidencias con el fin de extraer información (ciberespionaje) o con propósitos potencialmente destructivos.</p>
Aprendizaje automático (Machine Learning, ML)	<p>Tecnología de Inteligencia Artificial que capacita a los sistemas para aprender y evolucionar a través de los datos. Los algoritmos de <i>Machine Learning</i> examinan vastas cantidades de información con el propósito de reconocer patrones y efectuar predicciones o tomar decisiones.</p> <p>Refiere la capacidad de las máquinas para enseñarse a sí mismas o de aprender sin ser programadas por un humano.</p> <p>Es una subdisciplina de IA en la que un programa “aprende” a partir de la experiencia (desde bases de datos o sensores físicos). Este aprendizaje se puede mantener en el tiempo mientras suministre nueva experiencia y permite extraer nuevos patrones e información previamente no conocida.</p> <p>El Aprendizaje automático adaptado a la gobernanza de los datos sanitarios se refiere a que la IA puede utilizar datos repartidos en distintas infraestructuras mediante el aprendizaje federado, o su evolución, la inteligencia en enjambre. En este último, particularmente, se minimizan problemas de privacidad y ciberseguridad mediante la seudonimización y la encriptación de datos. El Espacio Europeo de Datos Sanitarios será un sistema descentralizado con potencial para ser utilizado por estas modalidades de IA.</p>
Aprendizaje profundo (Deep Learning, DL)	<p>Es una vertiente avanzada del <i>Machine Learning</i> que facilita el análisis y procesamiento de grandes cantidades de datos de manera compleja. Se vale de redes neuronales multinivel para detectar patrones y hacer predicciones con un elevado grado de precisión. Utiliza redes bayesianas y el algoritmo de retropropagación del gradiente de error para el entrenamiento de redes de neuronas con capas ocultas. En medicina comenzó a funcionar hace diez años con imágenes médicas.</p> <p>El aprendizaje profundo aporta también grandes avances a la modelización, uso y procesamiento digital del lenguaje humano, sin olvidar que estas tecnologías transforman los textos en modelos numéricos para luego volver a generar un texto, lo que determina el riesgo de que no sea veraz en su contenido y por ello de las “alucinaciones”, fallos, confusiones o desvaríos del sistema.</p> <p>En la actualidad existen riesgos en la traducción de lenguas, extracción de información en textos originales o en los diálogos máquina-humano, o en el análisis de emociones. Aporta grandes ventajas en el desarrollo del método científico, generación de hipótesis, diseño de experimentos, análisis de datos o refutación de hipótesis.</p>
Artificial General Intelligence (AGI)	<p>La IA General (<i>Artificial General Intelligence</i>) o IA Fuerte es la meta a la que aspiran los teóricos de la IA. Básicamente se producirá cuando se desarrolle una IA que sea indistinguible de la humana, o incluso supere sus capacidades, lo que se ha dado en llamar Superinteligencia Artificial, que otros autores refieren como singularidad tecnológica.</p>
Ataque de colisión. Hash	<p>Los ciberdelincuentes intentan encontrar dos conjuntos de datos diferentes que tienen el mismo hash. Si tienen éxito, pueden utilizar el hash común para engañar a un sistema que confía en el hash para verificar la integridad de los datos.</p>
Ataque de denegación de servicio (DDoS)	<p>Sobrecarga de un sistema o red con tráfico falso para hacerlo inaccesible a los usuarios legítimos. Como método, pueden ser originados a través de botnets, una red de ordenadores o dispositivos (IoT por ejemplo) conectados a Internet (bots) controlados remotamente por un atacante. Otros usos maliciosos comunes de las botnets son el envío masivo de spam.</p>

Ataque de fuerza bruta	Método para descifrar contraseñas o claves de cifrado mediante la prueba exhaustiva de todas las combinaciones posibles.
ChatGPT	<p>Es un chatbot impulsado por IA Generativa basada en LLM creado por OpenAI que puede generar respuestas conversacionales similares a las de una persona como respuesta a un prompt. La primera versión que se popularizó masivamente fue ChatGPT 3.5 a finales de 2022, que evolucionó hasta llegar a ChatGPT-4o y o1-preview a los que se ha unido ChatGPT Pro en diciembre de 2024.</p> <p>ChatGPT presenta una interfaz conversacional con la que, al interactuar parece como si se estuviera manteniendo una conversación con una persona.</p> <p>Las aplicaciones basadas en IA no emplean esta forma de interacción, sino que lo hacen directamente sobre API de OpenAI.</p> <p>Tras el enorme éxito de OpenAI con ChatGPT, otras compañías lanzaron productos similares como Copilot de Microsoft, Gemini de Google, Claude de Anthropic, Llama de Meta AI, Ernie de Baidu o Grok de xAI. Eso sí, el líder indiscutible para el gran público hoy en día es ChatGPT, hasta el punto de que prácticamente se emplea ChatGPT como sinónimo de IA en conversaciones no técnicas.</p>
Digitización	Se refiere a la creación de una representación digital de objetos o atributos físicos. Ésta es fundamental para conectar el mundo físico con el software. Digamos que es un habilitador para comenzar a crear valor.
Digitalización	Se refiere a habilitar o mejorar los procesos aprovechando las tecnologías digitales y los datos digitalizados. Ésta logra aumentar la productividad y la eficiencia además de permitir una reducción de costos, mejora un proceso o procesos existentes, pero no los cambia ni los transforma.
Espacio Europeo de Datos Sanitarios (EHDS)	<p>La propuesta del EHDS busca mejorar la asistencia sanitaria y acelerar la investigación en salud y, además, entre sus objetivos se encuentra facilitar a los agentes de I+D+i públicos y privados, dedicados a la salud digital, el acceso a datos sanitarios sensibles para el desarrollo de la IA. La gobernanza, normas, estándares, prácticas e infraestructuras incluidas abordan la posibilidad de compartir eficientemente datos de salud. Esta regulación se construye sobre la base de la directiva de ciberseguridad NIS I, el Reglamento General de Protección de Datos RGPD y principios de datos FAIR.</p> <p>El proyecto nacional IMPaCT está construyendo la base técnica para utilizar la información sanitaria en medicina de precisión, y deberá implementar las recomendaciones del EHDS en investigación. De forma análoga, aunque en una fase mucho más inicial, se ha propuesto el Espacio Europeo de Datos de Idiomas, destinado a la recopilación, creación y reutilización de datos de lenguaje para todas las industrias, incluyendo la sanitaria.</p>
Generative Pre-trained Transformer (GPT)	<p>Es un tipo de LLM basado en redes neuronales y en la arquitectura de Transformadores, que se entrenan de forma no supervisada con grandes cantidades de datos no etiquetados, dan como resultado sistemas capaces de generar contenidos originales con aspecto de haber sido elaborados por humanos.</p> <p>La mayoría de LLMs actuales comparten estas características por lo que es muy habitual referirse a todos estos modelos fundacionales modernos como GPT. Y el hecho de que OpenAI llamara a su primera herramienta ChatGPT (básicamente porque dotaba a un GPT de la capacidad de interactuar con los usuarios mediante el interfaz de un chat) y esta alcanzara una enorme popularidad, ha hecho que se emplee el término GPT como sinónimo de modelo fundacional basado en LLM y que se conozca como ChatGPT a la mayoría de los desarrollos similares al de OpenAI.</p>
Inteligencia Artificial (IA)	La Inteligencia Artificial es la capacidad que muestran los ordenadores que realizan tareas que normalmente necesitan inteligencia humana. Es una tecnología que permite a las máquinas entender lo que sucede a su alrededor y aprender de ello para tomar decisiones que las ayuden a cumplir con ciertos objetivos.



Inteligencia Artificial Débil	La Inteligencia Artificial Débil (<i>Weak AI</i> o <i>Narrow AI</i>) es, en esencia, de la que disponemos actualmente. Son sistemas de IA capaces de desarrollar una tarea concreta a un nivel similar al de la inteligencia humana, pero solo en un ámbito concreto.
Inteligencia Artificial Generativa (GenAI)	La IA Generativa (Generative AI o GenAI) es una tecnología avanzada de Inteligencia Artificial que utiliza modelos fundacionales de <i>Deep Learning</i> para crear contenidos (textos, imágenes, videos o audio, entre otros) partiendo de una petición del usuario. Estos modelos fundacionales (LLM) son capaces de crear resultados diferentes que están basados en los datos con los que han sido entrenados. No entregan copias idénticas de los datos originales, sino que “fabrican” contenidos basados en su aprendizaje.
Interoperabilidad	<p>Se refiere a la posibilidad de intercambiar y utilizar datos de distintas fuentes de forma sencilla y automática.</p> <p>En España y Europa, el uso de la información médica para I+D+i de IA se ha visto dificultado por una interoperabilidad desigual y por la fragmentación regional. En los últimos años, la comunidad sanitaria e investigadora ha buscado reducir la heterogeneidad de la información mediante la estandarización del conocimiento en terminologías clínicas, y alineando los formatos y la información contenida en las historias clínicas digitales.</p> <p>En España, la actual Estrategia de Salud Digital incluye el objetivo de disponer de una información de calidad interoperable, a nivel nacional e internacional. Con la participación de la Oficina del Dato se establece la creación de un Espacio Nacional de Datos de Salud para la generación de conocimiento científico.</p>
Modelos de Lenguaje Extensos (Large Language Model, LLM)	Son un tipo de modelo computacional diseñado para tareas de procesamiento del lenguaje natural, como la generación de lenguaje. Se conocen como Modelos fundacionales. Los LLMs consiguen estas capacidades mediante procesos de entrenamiento de forma auto-supervisada y semi-supervisada estableciendo relaciones estadísticas a partir de grandes cantidades de información en tiempos relativamente cortos.
Modelos fundacionales	Se denomina así a un tipo de modelos de IA de gran tamaño que se han entrenado con datos no etiquetados a gran escala y, en general, mediante aprendizaje no supervisado, lo que facilita que el proceso tenga lugar en un tiempo relativamente corto. El resultado son modelos que pueden ser empleados en una gran variedad de contextos. Algunos de los casos más conocidos de modelos fundacionales son BERT, GPT-3 o DALL-E.
Phishing	Engaño para obtener información confidencial, como contraseñas o datos bancarios, a través de correos electrónicos o sitios web falsificados. Ataque basado en la manipulación mediante ingeniería social (suplantación de una entidad legítima y otras) a través del correo electrónico u otros sistemas de mensajería, para robar información privada, hacer algún tipo de cargo o infectar el dispositivo. Para ello, típicamente se envían correos electrónicos (spam) en el que se adjuntan archivos infectados o enlaces a páginas fraudulentas.
Privacidad y acceso	<p>En Europa y España el acceso a datos sensibles de pacientes debe garantizar el cumplimiento de la regulación vigente de protección de datos y privacidad (RGPD). No obstante, la implantación del RGPD en el ámbito sanitario resulta compleja y podría beneficiarse de unas directrices éticas, legales y operacionales específicas cuando los datos se utilicen para la IA.</p> <p>Se recomienda recurrir a la seudonimización, al uso de datos encriptados, o la privacidad diferencial. Por otro lado, para poder realizar ensayos clínicos basados en evidencia es necesaria la decodificación de la información de las historias clínicas digitales y, en este sentido, es posible utilizar técnicas de IA para ocultar información personal y comprometida.</p>

Prompt	Es una orden o conjunto de pautas que se le proporciona a un modelo de Inteligencia Artificial para que produzca una respuesta. Funciona como un mensaje inicial que orienta a la IA sobre lo que debe hacer. Según el tipo de modelo fundacional usado, un prompt puede ser una pregunta, una oración, un fragmento de texto o incluso una descripción visual.
Ransomware	Software diseñado para dañar, explotar o robar datos de sistemas informáticos. Método de ataque cibernético basado en un tipo de programa malicioso (malware) que bloquea el acceso al sistema o a los datos a través de su cifrado.
Retrieval-Augmented Generation (RAG)	Esta técnica permite que los modelos de Inteligencia Artificial busquen información específica en un conjunto de documentos. De este modo, el modelo puede responder preguntas del usuario empleando datos concretos de esos documentos en lugar de depender solo de la información general con la que fue entrenado. Esto es útil para que el modelo pueda dar respuestas basadas en datos actualizados o en información específica de una empresa o área de conocimiento.
Singularidad tecnológica	<p>Se refiere al punto en la historia de la evolución humana en la que, tras desarrollar la primera Inteligencia Artificial General (AGI) cuyas capacidades intelectuales superen a las de las personas, los seres humanos nos enfrentemos a un momento en el que ya no seamos los seres más inteligentes del planeta. Existen predicciones de todo tipo sobre lo que sucederá en este punto, y la mayoría de ellas no son muy positivas. Sí hay bastante consenso respecto a que este momento llegará.</p> <p>Las principales empresas que están desarrollando sistemas de IA en el mundo, OpenAI, Microsoft, Google, Anthropic, Meta AI, Baidu o xAI, entre otras, están compitiendo por conseguir este objetivo en el marco de un nuevo mercado de la IA y la nueva revolución económica que supondrá.</p>
Spoofing	Falsificación de identidad en comunicaciones digitales para engañar a los usuarios y obtener acceso no autorizado a sistemas.
Tecnología sanitaria	De acuerdo con la definición de la Red Internacional de Agencias de Evaluación de Tecnologías de la Salud (INAHTA), se refiere a cualquier intervención que se puede utilizar para promover la salud, prevenir, diagnosticar o tratar enfermedades, así como para la rehabilitación o cuidado a largo plazo del paciente.
Transformación Digital	Se refiere a una transformación del negocio y su modelo, habilitados por la digitalización. La transformación digital no es sólo tecnología, si bien es importante indicar que ésta es un habilitador, para lo cual se requiere contar con tecnología que permita una gestión unificada, para ahorrar costes en gestión, y que, siendo robusta, también otorgue flexibilidad a la hora de definir procesos de transformación en el modelo de negocio o en el sistema sanitario.

Términos tomados de:

→ Gen Systems. Pirámide De La Transformación Digital (s.f.). <https://www.gensystems.net/piramide-de-la-transformacion-digital/>

→ García AC y Goussens A. “Ciberseguridad y uso de las TIC en el Sector Salud”. *Atención Primaria*. 2024; 56(3), 102854. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102854

→ Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C: Ciberseguridad: España en un sistema tecnológico y social en constante evolución. 2022

→ Estudio @aslan IA. Todo cambia. “Una perspectiva actual desde la industria de la innovación digital y ciberseguridad en España”. 2025



PERSPECTIVA 5

“Pensar la medicina no debe ser solo ordenar o discernir conocimientos, debe ser también decidir y desejar sobre las utopías de nuestro tiempo”. F. Bandrés

Uno de los grandes retos de la digitalización en salud, así como de las aplicaciones de la Inteligencia Artificial será el marco regulatorio, en sus diferentes vertientes, legal, ética y deontológica. La Comisión Europea ya hablaba en 2018 en su comunicado *Inteligencia Artificial para Europa* de la necesidad de una IA humanista, centrada en las personas y en la sociedad. En 2019 presentó unas directrices éticas mirando hacia una IA fiable. En mayo de 2024 el consejo europeo aprobó la AI ACT como primer reglamento mundial en IA atendiendo al análisis del daño y riesgos potenciales: inaceptables, altos, limitados y mínimos, que podían derivarse del uso de la IA, lo que implica y exige hacer un uso crítico, interdisciplinar, humanista, responsable y respetuoso con los derechos humanos y el medioambiente.

El Parlamento Europeo en su reglamento 2024/1689 establece normas armonizadas en materia de Inteligencia Artificial y la importancia de sus aplicaciones en el ámbito de la asistencia sanitaria dependiendo de las circunstancias relativas y su nivel de utilización y desarrollo, ya que pueden determinar riesgos que menoscaben los intereses públicos y los derechos fundamentales, sean perjuicios, físicos, psíquicos, sociales o económicos. Estos riesgos ponen de manifiesto la necesidad de un marco regulatorio, no solo legal sino también ético y deontológico, referido fundamentalmente a la introducción en el mercado, puesta en servicio y utilización de estos sistemas mirando al objetivo fundamental de que estas tecnologías deben estar centradas en el ser humano, siendo herramientas cuya finalidad es aumentar el bienestar humano. En el marco de la asistencia sanitaria, especialmente, es de gran importancia mantener el principio de confianza en estas tecnologías. Es por ello importante no solo del mercado CE como norma obligatoria identificable en el producto, sino asegurarnos también de que la intervención humana esté presente en la supervisión y control de estos sistemas, tal y como refiere el reglamento del Parlamento Europeo.

Los sistemas de IA de alto riesgo se diseñarán y desarrollarán de modo que puedan ser vigilados de manera efectiva por personas físicas durante el período que estén



en uso, lo que incluye dotarlos de herramientas de interfaz humano-máquina adecuadas. El objetivo de la supervisión humana será prevenir o reducir al mínimo los riesgos para la salud, la seguridad o los derechos fundamentales que pueden surgir cuando se utiliza un sistema de IA de alto riesgo conforme a su finalidad prevista o cuando se le da un uso indebido razonablemente previsible, en particular cuando dichos riesgos persistan a pesar de la aplicación de otros requisitos establecidos en la presente sección. Las medidas de supervisión serán proporcionales a los riesgos, al nivel de autonomía y al contexto de uso del sistema de IA de alto riesgo.

Salud, seguridad y derechos fundamentales son la perspectiva que debe guiar las aplicaciones de la IA, por ello se observan tendencias transnacionales en la regulación de la Inteligencia Artificial relacionada con la salud⁴. Las iniciativas regulatorias internacionales ofrecen oportunidades para el aprendizaje transnacional, pero corren el riesgo de complicar la innovación transnacional. Los enfoques para regular la IA en salud están apenas tomando forma, varían significativamente y podrían cambiar drásticamente en virtud de los cambios sobre políticas sanitarias. Las políticas regulatorias para la IA Pre-Generativa (IAPG), que utiliza análisis predictivos basados en aprendizaje automático, están más consolidadas y son más consistentes que las de la



IA Generativa, que abarca modelos básicos y sus aplicaciones derivadas. Esto se debe a que la IAPG ha estado disponible durante décadas y se ha gestionado bajo vías regulatorias establecidas que han tratado la IA en salud como *“software como dispositivo médico”*. La armonización transnacional de los regímenes regulatorios es incipiente y probablemente represente un desafío, pero los enfoques para regular la IAPG parecen ser susceptibles de una alineación internacional. La investigación sobre métricas estandarizadas y marcos de evaluación para la IA en el ámbito sanitario presenta una prometedora vía de colaboración internacional.

Es necesario considerar la divulgación, humanización y vulnerabilidad contextual de los chatbots de IA generativa⁵. Argumentamos que, en el caso de las aplicaciones de salud, incluyendo dispositivos médicos y aplicaciones de bienestar, la divulgación debería ser obligatoria.

Las aplicaciones de la digitalización y la IA en salud ya están demostrando el gran salto cualitativo en el cuidado de la salud. Sirva como ejemplo cómo los millones de datos sanitarios que generamos hoy deberían ser utilizados con criterios de calidad, disponibles e interoperables; sabemos que todavía estamos en una fase de infrautilización. Junto a las expectativas sociales y pro-

fesionales que en el ámbito de la salud plantea la IA surgen de forma paralela problemas y retos relacionados con la gestión sanitaria como son la seguridad, privacidad, acceso a los datos e inequidad. Se hace necesaria pues de la existencia de un marco regulatorio legal ético y deontológico en el que la evaluación y supervisión humanas permitan afrontar los desafíos sociales, técnicos y regulatorios a fin de que la implantación clínica de la IA en salud esté enmarcada en la excelencia profesional multidisciplinar, por cuanto son muchos los sectores profesionales que participan desde la industria, investigación, hospitales, sector salud, reguladores, evaluadores y legisladores⁶.

El médico humanista Lewis Thomas exploró proféticamente la Inteligencia Artificial (IA) en su ensayo: *“Sobre la Inteligencia Artificial”*, expresando profundas dudas sobre un mundo en el que las máquinas han superado la inteligencia humana. Si bien algunos desestimaron sus preocupaciones como exageradas, sus reflexiones enfatizaban la falibilidad humana como esencial para la creatividad, el aprendizaje y la responsabilidad ética, cualidades que la IA no puede replicar. Si bien la IA puede ayudarnos, la esencia de la sabiduría y la creación debe seguir siendo una tarea profundamente humana.

Todas las aplicaciones de la digitalización y la IA deben estar centradas en el paciente, quien da sentido a todo este quehacer, haciendo valer sus derechos en el marco de la información, el consentimiento, la aplicabilidad o la valoración de los riesgos, a fin de ejercer una toma de decisiones avalada por la deliberación y el reencuentro entre la confianza de la sociedad y la conciencia de los profesionales.

***“La sabiduría es lo que queda cuando la erudición se evapora”.* Prof. Carlos Díaz**

LEGISLACIÓN DE APLICACIÓN A LOS PRODUCTOS SANITARIOS DIGITALES

La regulación española y europea sobre Inteligencia Artificial, protección de datos y ciberseguridad para software o productos sanitarios digitales considerados productos sanitarios según el MDR (Reglamento de Productos Sanitarios) y el IVDR (Reglamento de Productos Sanitarios para el Diagnóstico In Vitro) está en constante evolución. Las principales regulaciones relevantes son:

1	<p>Reglamento (UE) 2017/745 sobre productos sanitarios (MDR). Establece los requisitos para la comercialización y la vigilancia de productos sanitarios en la Unión Europea. Los productos sanitarios digitales que cumplen con la definición de producto sanitario bajo el MDR deben seguir estos requisitos, que incluyen la evaluación de la conformidad, la gestión de riesgos y la vigilancia post-comercialización. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R0745</p>	<p>En España este reglamento se adoptó a través del Real Decreto 192/2023, de 21 de marzo, por el que se regulan los productos sanitarios. https://www.boe.es/boe/dias/2023/03/22/pdfs/BOE-A-2023-7416.pdf</p>
2	<p>Reglamento (UE) 2017/746 sobre productos sanitarios de diagnóstico in vitro (IVDR) - Similar al MDR. El IVDR regula los productos sanitarios in vitro. Los softwares que se utilizan para el diagnóstico o análisis de muestras biológicas deben cumplir con los requisitos establecidos en este reglamento. https://www.boe.es/doue/2017/117/L00176-00332.pdf</p>	<p>En España está pendiente la aprobación del Real Decreto que adopte el reglamento europeo sobre productos sanitarios para el diagnóstico in vitro.</p> <p>La legislación actual en vigor es el Real Decreto 1662/2000, de 29 de septiembre, sobre productos sanitarios para diagnóstico “in vitro”. (BOE núm. 235, de 30 de septiembre). https://www.boe.es/buscar/pdf/2000/BOE-A-2000-17597-consolidado.pdf</p> <p>La Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) es la autoridad competente para la regulación de productos sanitarios en España y supervisa el cumplimiento del MDR y IVDR.</p>
3	<p>Reglamento General de Protección de Datos (UE) 2016/679 (RGPD). Regula el tratamiento de datos personales en la UE. Cualquier software o producto sanitario digital que maneje datos personales debe cumplir con las disposiciones del RGPD, que incluyen la obtención del consentimiento y la implementación de medidas de seguridad adecuadas, para garantizar su privacidad y seguridad en su transmisión, almacenaje, acceso o tratamiento, entre otros. https://www.boe.es/doue/2016/119/L00001-00088.pdf</p>	<p>La normativa de referencia en España en materia de Protección de Datos es la Ley Orgánica de Protección de Datos y Garantía de los Derechos Digitales (LOPD-GDD), cuyo objetivo es adaptar el derecho español al Reglamento europeo (RGDP), y complementar el RGPD en los aspectos en que se ha permitido libertad de regulación a los estados miembros de la UE y establece disposiciones específicas sobre la protección de datos personales. https://www.boe.es/buscar/pdf/2018/BOE-A-2018-16673-consolidado.pdf</p>
4	<p>Ley 41/2002 de Autonomía del Paciente. Regula derechos y obligaciones en relación con la información y documentación clínica. Esta ley tiene por objetivo garantizar el derecho de un paciente a la información sanitaria y también el poder tomar determinadas decisiones relativas a su salud. https://www.boe.es/buscar/pdf/2002/BOE-A-2002-22188-consolidado.pdf</p>	
5	<p>Reglamento (UE) 2024/1689 de Inteligencia Artificial de la UE. Establece el marco legal y las normas armonizadas para el desarrollo y uso de sistemas de IA en la Unión Europea, y tiene implicaciones para los productos sanitarios digitales que utilizan IA, estableciendo requisitos de transparencia, seguridad y responsabilidad garantizando la seguridad, la transparencia y la protección de los derechos fundamentales. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401689</p>	<p>Regulación de Inteligencia Artificial en España: El Gobierno de España aprobó en el mes de marzo el anteproyecto de ley para el buen uso y la gobernanza de la Inteligencia Artificial, con el objetivo de garantizar un uso ético, inclusivo y beneficioso de esta tecnología. Este marco normativo adapta la legislación española al Reglamento Europeo de IA, que ya está en vigor, combinando un enfoque regulador con el impulso a la innovación, incluyendo su aplicación en el sector sanitario.</p>

6	<p>Real Decreto 817/2023, de 8 de noviembre, que establece un entorno controlado de pruebas para el ensayo del cumplimiento de la propuesta de Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de Inteligencia Artificial.</p>	<p>El Real Decreto establece un entorno controlado de pruebas para ensayar el cumplimiento de ciertos requisitos por parte de algunos sistemas de Inteligencia Artificial que puedan suponer riesgos para la seguridad, la salud y los derechos fundamentales de las personas. Asimismo, se regula el procedimiento de selección de los sistemas y entidades que participarán en el entorno controlado de pruebas</p>
7	<p>Ciberseguridad. Directiva (UE) 2022/2555 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de diciembre de 2022, (NIS-2) por el que se modifica la Directiva (UE) 2016/1148 (Directiva NIS) en lo que respecta a la resiliencia cibernética de los proveedores de servicios digitales y de los operadores de servicios esenciales. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2555</p>	<p>Actualización y ampliación de la Directiva NIS, con un enfoque más fuerte en la ciberseguridad y resiliencia de infraestructuras críticas, incluyendo el sector de la salud y exige medidas de seguridad estrictas para los productos sanitarios digitales, asegurando la protección contra ciberataques y el cumplimiento de estándares de seguridad informática.</p> <p>Para trasponer al ordenamiento jurídico nacional la Directiva NIS-2, el Gobierno de España sacó a audiencia pública en febrero el anteproyecto de Ley de Coordinación y Gobernanza de la Ciberseguridad, que reconoce al sector sanitario como uno de los sectores críticos que requiere medidas específicas de protección ante ciberataques. Esta norma pretende blindar las infraestructuras esenciales de España, como los hospitales y centros de salud y otras relacionadas (como los laboratorios de referencia de la UE o las entidades que fabrican productos farmacéuticos) que deberán implementar medidas de seguridad avanzadas para prevenir incidentes y gestionar los riesgos asociados a los ciberataques y las crecientes amenazas en el ámbito digital.</p> <p>https://www.interior.gob.es/opencms/pdf/servicios-al-ciudadano/participacion-ciudadana/Participacion-publica-en-proyectos-normativos/Audiencia-e-informacion-publica/01_2025_Anteproyecto_ley_coordinacion_gobernanza_ciberseguridad.pdf</p> <p>Además del Reglamento NIS2, existen estándares y guías específicas sobre ciberseguridad para productos sanitarios, como la guía MDCG 2019-16 rev.1, “Guidance on cybersecurity for medical devices”, que proporciona recomendaciones y buenas prácticas para garantizar la seguridad cibernética de los dispositivos médicos.</p> <p>El documento IMDRF/CYBER WG/N60FINAL:2020, titulado “Principles and Practices for Medical Device Cybersecurity”, se enfoca en establecer principios y prácticas clave para gestionar la ciberseguridad en los dispositivos médicos, promoviendo un enfoque estandarizado y efectivo en la protección de estos dispositivos a nivel internacional.</p>

8

Real Decreto 311/2022, de 3 de mayo, por el que se regula el **Esquema Nacional de Seguridad**.

El Esquema Nacional de Seguridad establece la política de seguridad para la protección adecuada de la información tratada y los servicios prestados a través de un planteamiento común de principios básicos, requisitos mínimos, medidas de protección y mecanismos de conformidad y monitorización para el sector público, así como los proveedores tecnológicos del sector privado que colaboran con la Administración.

Ámbitos de aplicación:

- A todo el sector público.
- Al sector privado, cuando presten servicios o provean soluciones a las entidades del sector público.
- Los pliegos de los contratos contemplarán todos aquellos requisitos necesarios para asegurar la conformidad con el ENS de los sistemas de información en los que se sustenten los servicios prestados por los contratistas.
- También la cadena de suministro de dichos contratistas, en la medida que sea necesario y de acuerdo con los resultados del correspondiente análisis de riesgos

9

El **Reglamento UE 2025/327** del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de febrero de 2025 relativo al **Espacio Europeo de Datos de Salud**, y por el que se modifican la Directiva 2011/24/UE y el Reglamento (UE) 2024/2847

El Reglamento establece el Espacio Europeo de Datos de Salud (EEDS), para lo cual se disponen reglas, normas e infraestructuras comunes y un marco de gobernanza, con vistas a facilitar el acceso a los datos de salud electrónicos a efectos del uso primario de los datos de salud electrónicos y el uso secundario de estos datos.

El Reglamento:

- a) desarrolla y complementa los derechos de las personas físicas establecidos en el Reglamento (UE) 2016/679 con respecto al uso primario y uso secundario de sus datos de salud electrónicos personales;
- b) establece reglas comunes para los sistemas de historias clínicas electrónicas (sistemas HCE) en relación con dos componentes obligatorios armonizados de programa informático, a saber, el componente de programa informático europeo de interoperabilidad para sistemas HCE y el componente de programa informático europeo de registro para sistemas HCE, tal como se definen en el artículo 2, apartado 2, letras n) y o), respectivamente, y para las aplicaciones de bienestar para las que se afirme que son interoperables con los sistemas HCE en relación con esos dos componentes armonizados de programa informático, en lo que respecta al uso primario de datos de salud electrónicos;
- c) introduce reglas y mecanismos comunes para el uso primario y el uso secundario de datos de salud electrónicos;
- d) establece una infraestructura transfronteriza que permitirá el uso primario de datos de salud electrónicos personales en el conjunto de la Unión;
- e) establece una infraestructura transfronteriza para el uso secundario de datos de salud electrónicos;
- f) establece mecanismos de gobernanza y coordinación a nivel de la Unión y nacional tanto para el uso primario como para el uso secundario de datos de salud electrónicos.

**Riesgos ético-legales fundamentales derivados del uso de la IA en la asistencia sanitaria
(modificado de J. Mayol Cir. Esp. 2024; 102 (s1))**

RIESGO ÉTICO-LEGAL	ALTERNATIVAS
Déficit de formación en el funcionamiento y utilización de sistemas de IA.	<p>Alfabetizar en materia de IA sobre metodologías, derechos y obligaciones legales en el marco de la asistencia sanitaria.</p> <p>Definición de una estrategia de la organización sanitaria y sus principios éticos rectores.</p> <p>Establecer protocolos acordes con las directrices regulatorias, también de carácter interno y sistemas de evaluación de riesgos en el uso de la IA. Es necesario personal cualificado con talento y experiencia.</p> <p>Importancia de la gestión del autocuidado.</p>
Sesgos en el algoritmo diagnóstico y terapéutico. Riesgos en los sistemas de apoyo a la decisión clínica.	<p>Recopilar y utilizar datos diversos y representativos durante el entrenamiento de los sistemas.</p> <p>Implementar técnicas de mitigación de sesgo en los algoritmos.</p> <p>Realizar evaluaciones y auditorías periódicas para identificar. Valoraciones dinámicas.</p> <p>Monitorizar y trazar la actividad.</p>
Privacidad y confidencialidad. Riesgos de uso con fines no éticos. Seguridad de los datos y propiedad intelectual.	<p>Implementar medidas de seguridad y cifrado para proteger los datos de los pacientes.</p> <p>Obtener consentimiento informado y transparente para el uso de datos médicos.</p> <p>Anonimizar los datos personales de los pacientes.</p>
Transparencia. Riesgos derivados de los nuevos modelos de relación clínica, profesionales sanitarios-paciente, familia-institución.	<p>Derecho a la explicabilidad y la interpretabilidad de los modelos de IA y de sus resultados, no solo a la información.</p> <p>Proporcionar información clara y comprensible sobre cómo se toman las decisiones. Evaluación del riesgo sobre las decisiones.</p> <p>Fomentar la rendición de cuentas y la divulgación de los procesos de IA en el marco de la estrategia de la organización.</p> <p>Formación adecuada de los profesionales.</p>
Impacto social. Permitir una mejora de la productividad y de la competitividad, la eficiencia, los costes y la seguridad. Riesgos de discriminación social, económica, de acceso a la información.	<p>Evaluar y abordar los impactos sociales y económicos de la implementación de IA.</p> <p>Promover la equidad y la justicia en el acceso y el uso de la tecnología de IA.</p> <p>Fomentar la participación y la diversidad de las partes interesadas en su desarrollo.</p> <p>Fomentar la confianza pública y la adecuada formación.</p>
Responsabilidad. Riesgos derivados de la delegación de responsabilidades e interpretación de los datos.	<p>Establecer marcos legales, regulaciones y protocolos acordes con la finalidad de uso.</p> <p>Establecer controles, estándares y políticas que fomenten la eficiencia operativa y la sinergia a fin de promover el uso responsable pertinente y eficaz maximizando su valor e impacto.</p> <p>Establecer principios éticos rectores.</p> <p>Asignar roles y responsabilidades claras a los actores involucrados en la IA.</p> <p>Implementar mecanismos de supervisión y rendición de cuentas adecuados. Evaluar riesgos a terceras partes.</p>
Sesgo de datos	<p>Evaluar y mitigar el sesgo de los datos utilizados en el entrenamiento de la IA.</p> <p>Realizar pruebas y validaciones regulares para detectar sesgos en los resultados.</p> <p>Incorporar enfoques inclusivos y multidisciplinarios en la recopilación de datos.</p>

NOTAS AL FINAL

→ **1** Horóscopos genéticos. Humanidades e investigación científica, pág. 257. Ed. Norbert Bilbeny y Joan Guardia. Universidad de Barcelona, 2015.

→ **2** Este entrenamiento se basa en una tarea aparentemente sencilla pero que permite, dado un volumen suficiente de textos, aprender las reglas del lenguaje humano. En 2021 investigadores de Google descubrieron de manera inesperada que estos LLM podían, además de traducir idiomas, resolver cualquier tarea que se les planteara sin necesidad de entrenamiento previo específico, si bien había que ofrecer al LLM una descripción en lenguaje natural sobre la tarea, algo que se denominó zero-shot learning. Esta capacidad permite, por ejemplo, responder preguntas clínicas o resumir informes médicos sin que sea necesario un entrenamiento específico. Los LLM ganaron verdadera popularidad en octubre de 2022, cuando OpenAI lanzó ChatGPT, e hicieron accesible esta tecnología de manera gratuita.

→ **3** Estos estudios se enfocan en diagnósticos diferenciales de casos infrecuentes o en resolver preguntas tipo test, pero omiten aspectos esenciales, como el manejo de la incertidumbre o la interpretación de la narrativa del paciente que incluso podría percibir sus respuestas como más empáticas que las realizadas por los profesionales de la salud. Investigaciones actuales avalan la posibilidad de tener un chatbot de IA generativa para el tratamiento de la salud mental (Therabot) altamente personalizado y efectivo a la vez que permite abordar los problemas de interacción y retención de usuarios en las terapias digitales. Es muy probable que con una mayor experiencia investigadora y de muestras clínicas sea posible confirmar la eficacia y generalización de estas aplicaciones.

→ **4** Sobre todo, si consideramos los usos de alto riesgo como pueden ser los sistemas de IA que impidan o alteren el acceso a servicios privados esenciales y a servicios y prestaciones públicos esenciales y disfrute de estos servicios y prestaciones, como es el caso de la asistencia sanitaria; incluso los destinados para el reconocimiento de emociones.

→ **5** Tras los recientes avances en Inteligencia Artificial (IA) generativa, los organismos reguladores intentan mantenerse al día. Una decisión clave es si se debe exigir a los desarrolladores de aplicaciones que revelen el uso de chatbots con IA generativa en sus productos. Algunos chatbots basados en IA generativa inducen a los consumidores a usarlos de formas no deseadas, lo que genera riesgos para la salud mental, haciéndolos vulnerables contextualmente, definidos como un estado temporal de susceptibilidad a daños u otros efectos adversos para la salud mental, derivados de la relación entre las interacciones del usuario con un sistema específico y la respuesta de este.

→ **6** (Ver en: Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados. Oficina C. noviembre de 2022).



INFORME I

LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

V. Conclusiones



Conclusiones

V.

Conclusiones

1

La tecnología debería ser una “seña” circunstancial que no debe ocupar o suplantar nuestra identidad. La tecnología sanitaria surge y evoluciona para acompañar a nuestra identidad genuina, personal y social, se expresa mediante una actividad que conlleva no solo investigación sino también el desarrollo y ejecución de lo proyectado, para obtener “un producto”, ya sea, bienes, servicios o conocimiento.

Las tecnologías sanitarias relacionan de manera directa el producto y la actividad, lo que precisa de una convivencia e hibridación con las realidades de la ciencia, la técnica y la tecnología. Las ciencias biomédicas y de la salud deben considerar esta hibridación por cuanto es un área del saber que tiene en su horizonte, de forma permanente e inmediata, al paciente.

La tecnología sanitaria a través de la digitalización y la Inteligencia Artificial abarca y recoge un conjunto de conocimientos no solo científicos y técnicos sino también económicos, culturales y sociales pues su objetivo es la obtención de productos y la producción de bienes o servicios que buscan el bienestar y mejorar la calidad de vida.



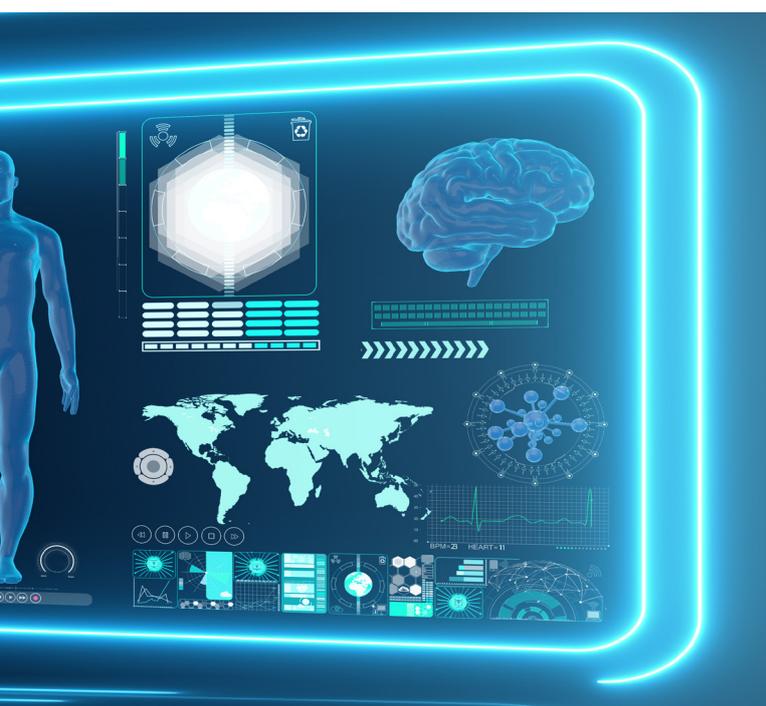
“Ojalá que el que esto leyere, si comparte mis convicciones, conmigo avance, si conmigo vacila, conmigo busque, si un error suyo reconoce me lo confiese, si el error es mío hágamelo saber”. **Agustín de Hipona**

2 Las tecnologías sanitarias, a través de la digitalización y la Inteligencia Artificial, se incorporan e integran en todas las áreas de la organización sanitaria, afectando no solo a los usuarios del sistema sino también y de manera muy importante a los profesionales de la salud, los proveedores de servicios sanitarios y la industria. Van mucho más lejos de incorporar tecnologías electrónicas o la mera digitalización de los procesos internos de las organizaciones sanitarias; determinan una nueva cultura de la organización sanitaria, nuevas formas de pensar, ejecutar y relacionarse en el ámbito de la asistencia sanitaria humanizada. Desde ella y arropados con las nuevas tecnologías haremos cambiar nuestra proxémica relacional con el paciente y su entorno social para renovar el arte de escuchar lo que no se ve y oír el rumor de lo que está por decir.

3 El desarrollo y alcance de la tecnología sanitaria, a través de la digitalización y la Inteligencia Artificial, conforman un conjunto de saberes eficaces acompañados de conocimientos, razones y causas, es una actividad creativa que exige talento y mira al horizonte de la nueva Medicina Personalizada de Precisión como paradigma.

Lleva implícita la transferencia de conocimiento y de valores, pues su objetivo es que sea aceptable, fiable, eficiente, equitativa, accesible y personalizada. La salud digital será un factor determinante para garantizar la cobertura universal, la protección y el cuidado de la salud. Los determinantes digitales de la salud serán complementos fundamentales de los determinantes sociales de la salud, pero también pueden poner de manifiesto nuevos factores de desigualdad si no afrontamos los riesgos de la brecha digital.

La digitalización y la IA son las tecnologías más importantes y disruptivas, que serán de gran impacto en la asistencia sanitaria y la economía de la salud del futuro. La transformación digital en salud y las aplicaciones de la Inteligencia Artificial tienen la capacidad de ofrecer nuevos servicios a los pacientes y usuarios e incorporar nuevas propuestas a la asistencia sanitaria basada en el valor de nuestro tiempo.



INFORME I

LA TECNOLOGÍA SANITARIA ANTE LA DIGITALIZACIÓN Y LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

VI. Bibliografía complementaria



Bibliografía
complementaria

VI.

Bibliografía complementaria

AÑO 2025

- **1.** Bilbeny N. “Superinteligencia y responsabilidad”. *Revista de Occidente*. 2025 (524), 53-70.
- **2.** Catapan SDC, Taylor ML, Scuffham P, Smith AC, Kelly JT. “Improving consumer trust in digital health: A mixed methods study involving people living with chronic kidney disease”. *Digital Health*. 2025; 11, 20552076241312440. DOI:10.1177/20552076241312440
- **3.** Castro TC, Castillo MRA y Labrador JRR. “Ciencia y Medicina: aliadas para aplicar la mejor evidencia a la práctica clínica”. *Medicina Clínica*. 2025; 164(11), 106938. DOI: 10.1016/j.medcli.2025.106938
- **4.** Cho PJ, Olaye IM, Shandhi MMH, Daza EJ, Foschini L, Dunn JP. “Identification of key factors related to digital health observational study adherence and retention by data-driven approaches: an exploratory secondary analysis of two prospective longitudinal studies”. *The Lancet Digital Health*. 2025; 7(1), e23-e34. DOI: 10.1016/S2589-7500(24)00219-X.
- **5.** Curry N, Allen E, Silsby L, Goodacre S, Deane C, Deary A, Al-Noor, F. “Multicenter Double-Blind Study Evaluating AI-Driven Detection of Proximal Deep Vein Thrombosis”. *NEJM AI*. 2025; 2(2). DOI: 10.1056/Aloa2400741
- **6.** De Freitas J, Cohen IG. “Disclosure, humanizing, and contextual vulnerability of generative AI chatbots”. *NEJM AI*. 2025; 2(2). DOI: 10.1056/Alpc2400464
- **7.** Elterman, D. “Beyond Medications—The Promise of App-Based Digital Therapeutics for Lower Urinary Tract Symptoms”. *NEJM evidence*. 2025; 4(4). DOI: 10.1056/EVIDe2500055
- **8.** Fins JJ. “Lewis Thomas on Artificial Intelligence”. *NEJM AI*. 2025; 2(4). DOI: 10.1056/Alp2401252
- **9.** Ghafur S, Callahan R, Blumenthal D. “Cross-National Trends in the Regulation of Health-Related Artificial Intelligence”. *NEJM AI*. 2025; 2(4). DOI: 10.1056/Alpc2401250
- **10.** Heinz MV, Mackin DM, Trudeau BM, Bhattacharya S, Wang Y, Banta HA, Jacobson NC. “Randomized Trial of a Generative AI Chatbot for Mental Health Treatment”. *NEJM AI*. 2025; 2(4). DOI: 10.1056/Aloa2400802
- **11.** Marra C, Chico T, Alexandrow A, Dixon WG, Briffa N, Rainaldi E, Morris, A. “Addressing the challenges of integrating digital health technologies to measure patient-centred outcomes in clinical registries”. *The Lancet Digital Health*. 2025; 7(3), e225-e231. DOI: 10.1016/S2589-7500(24)00223-1
- **12.** Taylor RA, Chmura C, Hinson J, Steinhart B, Sangal R, Venkatesh AK, Levin S. “Impact of Artificial Intelligence-Based Triage Decision Support on Emergency Department Care”. *NEJM AI*, 2025; 2(3). DOI: 10.1056/Aloa2400296
- **13.** Von Wyl V. “Improving digital study designs: better metrics, systematic reporting, and an engineering mindset”. *The Lancet Digital Health*. 2025; 7(1), e4-e5. DOI: 10.1016/S2589-7500(24)00244-9.
- **14.** Determinantes sociales de la salud – OPS/OMS Organización Panamericana de la Salud. [consultado 13 Abr 2025]. Disponible en: <https://www.paho.org/es/temas/determinantes-sociales-salud>

→ **15.** Estudio @aslan IA. Todo cambia. “Una perspectiva actual desde la industria de la innovación digital y ciberseguridad en España”. 2025.

→ **16.** Gobierno de España. Componente 19: Plan Nacional de Competencias Digitales (digital skills). 2023. [consultado 13 Abr 2025]. Disponible en: <https://planderecuperacion.gob.es/politicas-y-componentes/componente-19-plan-nacional-de-competencias-digitales-digital-skills>

→ **17.** Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Plan Estatal de Investigación Científica, Técnica y de Innovación 2024-2027. 2024 [consultado 16 de Abr de 2025]. Disponible en: https://www.ciencia.gob.es/dam/jcr:6e566243-bcb5-45d8-ab77-5cfe533060f2/PEICTI2024_2027.pdf

AÑO 2024

→ **1.** Allen B. “The promise of explainable AI in digital health for precision medicine: a systematic review”. *Journal of personalized medicine*. 2024; 14(3), 277. DOI: 10.3390/jpm14030277

→ **2.** Ban S, Kim Y, Seomun G. “Digital health literacy: A concept analysis”. *Digital health*. 2024; 10, 20552076241287894. DOI: 10.1177/20552076241287894

→ **3.** Belmonte IA, Collado RS, Yuguero O, Oliva JA, Martínez-Millana A Pérez CS. “La alfabetización digital como elemento clave en la transformación digital de las organizaciones en salud”. *Atención Primaria*. 2024; 56(6), 102880. DOI: 10.1016/j.aprim.2024.102880

→ **4.** Benezet-Mazuecos J, Alonso P, Lozano JM, Salas J, Lorenzo OG, Rodríguez-Mañero M, Barrio I. “Dispositivos digitales para la monitorización del ritmo cardiaco en pacientes con fibrilación auricular programados para cardioversión eléctrica ambulatoria”. *Medicina Clínica*. 2024; 163(10), 496-502. DOI: 10.1016/j.medcli.2024.07.006

→ **5.** Bit-Avragim N, Bousquet J, Cantù S, Omboni S, Ravot E, Tunnah P. “The evolving reality of digital health”. *Digital health*. 2024; 10, 20552076241277646. DOI: 10.1177/20552076241277646

→ **6.** Castro-Delgado R Ríos MP. “Artificial intelligence and emergency services: We need to take a step forward”. *Emergencias*. 2024; 36, 145-147. DOI: 10.55633/s3me/002.2024

→ **7.** Catalá-López F, Ridaio M, Tejedor-Romero L, Caulley L, Hutton B, Huse reau D, et al. “Transparency, openness, and reproducible research practices are frequently underused in health economic evaluations”. *J Clin Epidemiol*. 2024; 165: 111208, DOI: 10.1016/j.jclinepi.2023.10.024.

→ **8.** Chivato-Pérez T, Menasalvas-Ruiz E, Graña-Castro O, Piñas-Mesa A. “Transformación de la relación médico-paciente: integración de la Inteligencia Artificial y big data en la práctica clínica”. En: *Manual de la relación médico-paciente*. Segunda edición revisada y ampliada. Madrid: Foro de la Profesión Médica de España; 2024. pp. 527-541. ISBN: 978-84-09-65178-8.

→ **9.** Esquerda M y Esquerda FP. “Inteligencia Artificial en medicina: aspectos éticos, deontológicos y el impacto en la relación médico-paciente”. *Medicina Clínica*. 2024; 162(1), 6. DOI: 10.1016/j.medcli.2024.03.003

→ **10.** Ferrero JIM. “Perspectiva económica y social de la responsabilidad profesional sanitaria”. *Medicina Clínica*. 2024; 162(1), 1. DOI: 10.1016/j.medcli.2023.12.024

→ **11.** García AC y Goussens A. “Ciberseguridad y uso de las TIC en el Sector Salud”. *Atención Primaria*. 2024; 56(3), 102854. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102854

→ **12.** Ginsburg GS, Picard RW, Friend SH. “Key issues as wearable digital health technologies enter clinical care”. *New England Journal of Medicine*. 2024; 390(12), 1118-1127. DOI: 10.1056/NEJMra2307160

→ **13.** Kaldoudi E. “Smart hospital: The future of healthcare”. *Computational and Structural Biotechnology Journal*. 2024; 24, 87-88. DOI: 10.1016/j.csbj.2023.12.011

→ **14.** Mayol J. “Soluciones digitales y las ciencias de la salud”. *Cirugía Española*. 2024; 102, S3-S7. DOI: 10.1016/j.ciresp.2023.10.007

→ **15.** Merino M, Del Barrio J, Nuño R, Errea M. “Value-based digital health: A systematic literature review of the value elements of digital health care”. *Digital health*. 2024; 10, 20552076241277438. DOI: 10.1177/20552076241277438

→ **16.** Millum J. “Ethics and health research priority setting: A narrative review”. *Wellcome Open Res*. 2024; 9: 203. DOI: 10.12688/wellcomeopenres.21182.1.



- **17.** Pérez AG. “Inteligencia Artificial: ciencia y humanismo”. *Revista de Occidente*. 2024 (523), 10.
- **18.** Sim I, Cassel C. “The ethics of relational AI-expanding and implementing the Belmont principles”. *N Engl J Med*. 2024; 391(3), 193-196. DOI: 10.1056/NEJMp2314771
- **19.** Snyder Sulmasy L, Burnett JR, Carney JK, DeCamp M. “ACP Ethics, Professionalism and Human Rights Committee. Ethics and academic discourse, scientific integrity, uncertainty, and disinformation in medicine: An American College of Physicians position paper”. *Ann Intern Med*. 2024; 177: 1244-1250. DOI: 10.7326/m24-0648, 10.7326/M24-0648.
- **20.** Vukmir RB. “Medicolegal aspects of documentation and the electronic health record”. *Medicina Clínica*. 2024; 162(8), e9-e14. DOI: 10.1016/j.medcli.2024.01.006
- **21.** Zaldúa YC, Alòs F, Mur MC, Belmonte IA, Rodríguez VF, Vidal-Alaball J. “Análisis de las interrupciones generadas por el uso de los smartphones entre los profesionales sanitarios de Atención Primaria”. *Atención Primaria*. 2024; 56(4), 102855. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102855
- **22.** Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD). *Artificial intelligence and the health workforce: Perspectives from medical associations on AI in health*. OECD; 2024. DOI: 10.1787/9a31d8af-en.
- **23.** Padilla-Bernáldez J, del-Pino-Matute E, Pollán-Santamaría M, Lacunza Aguirrebengoa I, Cobo-Castro T. “Declaración institucional por una buena ciencia y su mejor aplicación a la medicina clínica”: e202410058. *Rev Esp Salud Pública*. 18 de octubre de 2024; 98: 2 [consultado 16 de Abr de 2025]. Disponible en: <https://ojs.sanidad.gob.es/index.php/resp/article/view/928>

AÑO 2023

- **1.** Arias López MDP, Ong BA, Borrat Frigola X, Fernández AL, Hicklent RS, Obeles AJT, et al. “Digital literacy as a new determinant of health: A scoping review”. *PLOS Digit Health*. 2023; 2: e0000279. DOI: 10.1371/journal.pdig.0000279
- **2.** Beasley JM, Johnston EA, Costea D, Sevick MA, Rogers ES, Jay M, et al. “Adapting the Diabetes Prevention Program for Older Adults: Descriptive Study”. *JMIR*

Form Res. 2023; 7: e45004. DOI: 10.2196/45004

- **3.** Chan YK, Tang YM y Teng L. “A comparative analysis of digital health usage intentions towards the adoption of virtual reality in telerehabilitation”. *Int J Med Inform*. 2023; 174: 1-10. DOI: 10.1016/j.ijmedinf.2023.105042
- **4.** Coghlan S, Leins K, Sheldrick S, Cheong M, Gooding P, D’Alfonso S. “To chat or bot to chat: Ethical issues with using chatbots in mental health”. *Digital health*. 2023; 9, 20552076231183542. DOI: 10.1177/20552076231183542
- **5.** Harrer S. “Attention is not all you need: the complicated case of ethically using large language models in healthcare and medicine”. *EBioMedicine*. 2023; 90: 104512. DOI: 10.1016/j.ebiom.2023.104512
- **6.** Jiménez-Carrillo M, González-Rábago Y, Miguel RG, Bueno MB. “De la consulta presencial a la teleconsulta: experiencias de profesionales de atención primaria del País Vasco durante la pandemia”. *Atención Primaria*, 2023; 55(10), 102702. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102702
- **7.** Lee P, Bubeck S, Petro J. “Benefits, limits, and risks of GPT-4 as an AI Chatbot for Medicine”. *New England Journal of Medicine*. 2023; 388(13), 1233-1239. DOI: 10.1056/NEJMs2214184
- **8.** Mayer MA. “Inteligencia Artificial en atención primaria: un escenario de oportunidades y desafíos”. *Atención Primaria*. 2023; 55(11), 102744. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102744
- **9.** Mayol J. “Data, big data, and surgery”. *BJS Academy*; 2023. Disponible en: <https://www.bjsacademy.com/bjs-academy/continuing-surgical-education/data-big-data-and-surgery>
- **10.** Miró Q, Fuster-Casanovas A, Vidal-Alaball J, Escalé-Besa A, Marín-Gómez FX, Femenina J, et al. “Knowledge and perception of primary care healthcare professionals on the use of artificial intelligence as a healthcare tool”. *Digital Health*. 2023; 14: 9: 20552076231180511. DOI: 10.1177/20552076231180511
- **11.** Piliuk K, Tomforde S. “Artificial intelligence in emergency medicine. A systematic literature review”. *Int J Med Inform*. 2023; 180: 105274. DOI: 10.1016/j.ijmedinf.2023.105274



- **12.** Rego S, Gorini C. “Aspectos éticos del uso del Big Data” EIDON. Revista española de bioética. 2023; (60), 42-58. DOI: 10.13184/eidon.60.2023.42-58
- **13.** Resnik DB. “Disclosing and managing non-financial conflicts of interest in scientific publications”. Res Ethics. 2023; 19: 121-138. DOI: 10.1177/17470161221148387
- **14.** Sallam M. “ChatGPT utility in healthcare education research, and practice: Systematic review on the promising perspectives and valid concerns”. Healthcare. 2023; 11: 887. DOI: 10.3390/healthcare11060887
- **15.** Sezgin E. “Artificial intelligence in healthcare: complementing, not replacing, doctors and healthcare providers”. Digital health. 2023; 9, 20552076231186520. DOI: 10.1177/20552076231186520
- **16.** Sun T, He X, Li Z. “Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges”. Digital Health. 2023; 9, 20552076221149651. DOI: 10.1177/20552076221149651
- **17.** Topol E. “Machines and empathy in medicine”. Lancet. 2023; 402: 1411. DOI: 10.1016/S0140-6736(23)02292-4.
- **18.** Van de Vijver S, Tensen P, Asiki G, Requena-Méndez A, Heidenrijk M, Stronks K, et al. “Digital health for all: How digital health could reduce inequality and increase universal health coverage”. Digital Health. 2023; 9: 20552076231185434. DOI: 10.1177/20552076231185434
- **19.** Vidal-Alaball J, Alarcon Belmonte I, Panadés Zafra R, Escalé Besa A, Acezat Oliva J, Saperas Pérez C. “Abordaje de la transformación digital en salud para reducir la brecha digital”. Atención Primaria. 2023; 55: 102626. DOI: 10.1016/j.aprim.2023.102626
- **20.** Wilandika A, Pandin MGR, Yusuf A. “The roles of nurses in supporting health literacy: a scoping review”. Front Public Health. 2023; 11: 1022803. DOI: 10.3389/fpubh.2023.1022803
- **21.** Asociación Española de Normalización (UNE). Informes de Normalización. Estándares para la salud digital. 2023.
- **22.** Observatorio Economía y Salud Boehringer Ingelheim. La digitalización como motor de la transformación del Sistema Nacional de Salud. 2023.

https://centroestudiospoliticaspUBLICAS.com/observatorios/economia-salud/wp-content/uploads/2023/04/230214_2o-informe-Observatorio-Economia-y-Salud.pdf

- **23.** Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C: Desinformación en la era digital. 2023
- **24.** OpenAI. “GPT-4 Technical Report”. ArXiv (2023). DOI: 10.48550/arXiv.2303.08774

ANTERIOR A 2023

- **1.** Boucher EM, Harake NR, Ward HE, et al. “Artificially intelligent chatbots in digital mental health interventions: a review”. Expert Rev Med Devices, 2021; 18: 37-49. DOI: 10.1080/17434440.2021.2013200
- **2.** Björnsson B, Borrebaeck C, Elander N, et al. “Digital twins to personalize medicine”. Genome Med. 2020; 12: 1-4. DOI: 10.1186/s13073-019-0701-3
- **3.** De Benedictis A, Mazzocca N, Somma A, et al. “Digital twins in healthcare: an architectural proposal and its application in a social distancing case study”. IEEE J Biomed Health Inform. 2022. Epub ahead of print. DOI: 10.1109/JBHI.2022.3205506.
- **4.** Fjeld J, Achten N, Hilligoss H, et al. “Artificial Intelligence: Mapping consensus in ethical and rights-based approaches to principles for AI”. SSRN Electron J, 2020. DOI: 10.2139/ssrn.3518482
- **5.** Frank DA, Elbæk CT, Børsting CK, et al. “Drivers and social implications of Artificial Intelligence adoption in healthcare during the COVID-19 pandemic”. PLoS One. 2021; 16: 1-11. DOI: 10.1371/journal.pone.0259928
- **6.** Goecks J, Jalili V, Heiser LM, et al. “How Machine Learning will Transform Biomedicine”. Cell 2020; 181(1): 92-101. DOI: 10.1016/j.cell.2020.03.022
- **7.** Halbig A, Babu SK, Gatter S, Latoschik ME, Brukamp K, von Mammen S. “Opportunities and challenges of virtual reality in healthcare – A domain experts inquiry”. Front Virtual Real. 2022; 3: 837616. DOI: 10.3389/frvir.2022.837616.
- **8.** Hou Y-CC, Yu H-C, Martin R, et al. “Precision medicine integrating whole-genome sequencing, compre-



hensive metabolomics, and advanced imaging”. *Proc Natl Acad Sci*, 2020; 117(6): 3053-3062. DOI: 10.1073/pnas.1909378117

→ **9.** Jassar S, Adams SJ, Zarzeczny A, Burbridge BE. “The future of artificial intelligence in medicine: Medical-legal considerations for health leaders”. *Health Manage Forum*. 2022; 35: 185-189. DOI: 10.1177/08404704221082069.

→ **10.** Jha S, Topol EJ. “Adapting to artificial intelligence: radiologists and pathologists as information specialists”. *JAMA*, 2016; 316(22): 2353-2354. DOI: 10.1001/jama.2016.17438

→ **11.** Kamel Boulos M, Nand Zhang P. “Digital twins: from personalised medicine to precision public health”. *J Pers Med*, 2021; 11: 745. DOI: 10.3390/jpm11080745

→ **12.** Kappel C, Rushton-Marovac M, Leong D, et al. “Pursuing connectivity in cardio-oncology care-The future of telemedicine and artificial intelligence in providing equity and access to rural communities”. *Front Cardiovasc Med*, 2022; 9: 927769. DOI: 10.3389/fcvm.2022.927769

→ **13.** Kelly CJ, Karthikesalingam A, Suleyman M, et al. “Key challenges for delivering clinical impact with artificial intelligence”. *BMC Med*, 2019; 17(1): 195. DOI: 10.1186/s12916-019-1426-2

→ **14.** Kelly JT, Campbell KL, Gong E, et al. “The internet of things: impact and implications for health care delivery”. *J Med Internet Res*. 2020; 22: e20135. DOI: 10.2196/preprints.20135

→ **15.** Kelly JT, Jegatheesan DK, Dawson J, et al. “Are digital health technologies and models of nutrition care the future of chronic kidney disease management?” *J Ren Nutr*. 2023; 33: S80-S87. DOI: 10.1053/j.jrn.2023.02.004

→ **16.** Liu H, Li L, Wormstone IM, et al. “Development and validation of a deep learning system to detect glaucomatous optic neuropathy using fundus photographs”. *JAMA Ophthalmol*. 2019; 137(12): 1353-1360. DOI: 10.1001/jamaophthalmol.2019.3501

→ **17.** Lubitz SA, Atlas SJ, Ashburner JM, Lipsanopoulos ATT, Borowsky LH, Guan W, et al. “Screening for Atrial Fibrillation in Older Adults at Primary Care

Visits: VITAL-AF Randomized Controlled Trial”. *Circulation*. 2022; 145: 946-954. DOI: 10.1161/CIRCULATIONAHA.121.057014.

→ **18.** Marti-Bonmati L, Koh D-M, Riklund K, et al. “Considerations for artificial intelligence clinical impact in oncologic imaging: an AI4HI position paper”. *Insights Imaging*, 2022; 13(1): 89. DOI: 10.1186/s13244-020022-01220-9

→ **19.** Milea D, Najjar RP, Jiang Z, et al. “Artificial intelligence to detect papilledema from ocular fundus photographs”. *N Engl J Med*, 2020; 382(18): 1687-1695. DOI: 10.1056/NEJMoa1917130

→ **20.** Morgan AA, Abdi J, Syed MAQ, el Kohen G, Barlow P, Vizcaychipi MP. “Robots in healthcare: A scoping review”. *Curr Robot Rep*. 2022; 3: 271-280. DOI: 10.1007/s43154-022-00095-4

→ **21.** Nadarzynski T, Miles O, Cowie A, et al. “Acceptability of artificial intelligence (AI)-led chatbot services in healthcare: a mixed methods study”. *Digital health*. 2019; 5: 205520761987180. DOI: 10.1177/2055207619871808

→ **22.** Naik N, Hameed BMZ, Shetty DK, Swain D, Shah M, Paul R, et al. “Legal and ethical consideration in artificial intelligence in healthcare: Who takes responsibility?” *Front Surg*. 2022; 9: 862322. DOI: 10.3389/fsurg.2022.862322.

→ **23.** Rajpurkar P, Chen E, Banerjee O, et al. “AI in health and medicine”. *Nat Med*, 2022; 28(1): 31-38. DOI: 10.1038/s41591-021-01614

→ **24.** Reddy S. “Explainability and artificial intelligence in medicine”. *Lancet Digit Health*, 2022; 4(4): e214-e215. DOI: 10.1016/S2589-7500(22)00029-2

→ **25.** Salcedo ED, Vidal-Alaball J. “Accesibilidad y brecha digital, la Ley de cuidados inversos 2.0”. *Atención Primaria*. 2022; 54: 102485. DOI: 10.1016/j.aprim.2022.102485.

→ **26.** Savage N. “Robots rise to meet the challenge of caring for old people”. *Nature*. 2022; 601(7893): S8-S10. DOI: 10.1038/d41586-022-00072-z

→ **27.** Su Z, Li C, Fu H, Wang L, Wu M, Feng X. “Review of the development and prospect of telemedicine”. *Intelligent Medicine*. 2022. DOI: 10.1016/j.imed.2022.10.004.

→ **28.** Svennberg E, Tjong F, Goette A, Akoum N, Di Biase



- L, Bordachar P, et al. "How to use digital devices to detect and manage arrhythmias: An EHRA practical guide". *Europace*. 2022; 24: 979-1005. DOI: 10.1093/europace/euac038
- **29.** Wolff J, Pauling J, Keck A, et al. "Success factors of artificial intelligence implementation in health-care". *Front Digit Health*. 2021; 3, 594971. DOI: 10.3389/fgth.2021.594971
- **30.** Xie Y, Nguyen QD, Hamzah H, et al. "Artificial intelligence for teleophthalmology-based diabetic retinopathy screening in a national programme: an economic analysis modelling study". *Lancet Digit Health*, 2020; 2(5): e240-e249. DOI: 10.1016/S2589-7500(20)30060-1
- **31.** Zheng H, Feng Y, Tang J, Ma S. "Interfacing brain organoids with precision medicine and machine learning". *Cell Reports Physical Science*. 2022; 3(7). DOI: 10.1016/j.xcrp.2022.100974
- **32.** Consejo General de Colegios Oficiales de Médicos. Código de deontología médica 2022; 2022 [consultado 16 Abr 2025]. Madrid: CGCOM. Disponible en: https://www.cgcom.es/sites/main/files/files/2022-03/codigo_deontologia_medica.pdf
- **33.** ECRI. Diagnostic errors and test results top ECRI institute's patient safety list. [consultado 14 Abr 2025]. <https://www.ecri.org/press/diagnostic-errors-test-results-top-patient-safety-list>
- **34.** European Health and Digital Executive Agency (HaDEA). EU4Health. 2021. https://hadea.ec.europa.eu/programmes/eu4health_es
- **35.** Malpractice claims involving electronic health records on the rise. [consultado 14 Abr 2025] <https://www.thedoctors.com/articles/electronic-health-records-continue-to-lead-to-medical-malpractice-suits/>; 2021.
- **36.** Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades. Estrategia Española de I+D+I En Inteligencia Artificial. 2019.
- **37.** Ministerio de Economía. Estrategia Nacional de Inteligencia Artificial (ENIA). 2020.
- **38.** Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C: Ciberseguridad: España en un sistema tecnológico y social en constante evolución. 2022.
- **39.** Oficina de Ciencia y Tecnología del Congreso de los Diputados (Oficina C). Informe C: Inteligencia Artificial y salud: potencial y desafíos. 2022.
- **40.** Reglamento (UE) 2021/0106 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen normas armonizadas en materia de Inteligencia Artificial (ley de Inteligencia Artificial) y se modifican determinados actos legislativos de la Unión. COM/2021/206 final. Bruselas, 21.4. 2021.
- **41.** Reglamento (UE) 2021/694 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2021 por el que se establece el Programa Europa Digital y por el que se deroga la Decisión (UE) 2015/2240 (Texto pertinente a efectos del EEE). 2021.
- **42.** Secretaría General de Salud Digital, Información e Innovación para el SNS. Estrategia de Salud Digital Del SNS. 2021.
- **43.** World Health Organization. Proyecto de estrategia mundial sobre salud digital 2020-2025. Disponible en: <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240020924>





Cátedra Interuniversitaria

TECNOLOGÍA, SALUD Y SOCIEDAD

 Fundación
Ortega-Marañón

