

Aplicación de algoritmos genéticos y sistemas expertos en medicina asistencial

Aplicaciones clínicas de la inteligencia artificial

Application of genetic algorithms and expert systems in medical care. Clinical applications of artificial intelligence. *Executive abstract.*

INFORMES DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS SANITARIAS
AETSA 2009/6

INFORMES, ESTUDIOS E INVESTIGACIÓN

“Impreso en cartulina  y papel fabricado con pasta libre de madera”

Aplicación de algoritmos genéticos y sistemas expertos en medicina asistencial

Aplicaciones clínicas de la inteligencia artificial

Application of genetic algorithms and expert systems in medical care. Clinical applications of artificial intelligence. *Executive abstract*

INFORMES DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS SANITARIAS
AETSA 2009 / 6

Caballero Villarraso, Javier

Aplicación de algoritmos genéticos y sistemas expertos en medicina asistencial. Javier Caballero Villarraso, Antonio Romero Tabares, Francisco J. Gavilán León, Manuel Baena García, Francisco Javier Díez Vegas — Sevilla: Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de Andalucía, 2011.

56 p; 24 cm. (Colección: Informes, estudios e investigación. Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad. Serie: Informes de Evaluación de Tecnologías Sanitarias)

1. Inteligencia artificial 2. Sistemas especialistas I. Romero Tabares, Antonio II. Gavilán León, Francisco III. Baena García, Manuel IV. Díez Vegas, Javier V Andalucía. Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias VI. España. Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad VII. España. Ministerio de Ciencia e Innovación

Autores: Javier Caballero Villarraso, Antonio R. Tabares, Francisco J. Gavilán León, Manuel Baena García, Francisco Javier Díez Vegas.

Edita: Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias de Andalucía
Avda. Luis Montoto, 89 - 4ª planta
41007 Sevilla
España – Spain

Este documento se ha realizado en el marco de colaboración previsto en el Plan de Calidad para el Sistema Nacional de Salud elaborado por el Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad, al amparo del convenio de colaboración suscrito por el Instituto de Salud Carlos III, organismo autónomo del Ministerio de Ciencia e Innovación y la Fundación Progreso y Salud de Andalucía

ISBN: 978-84-96990-87-6

NIPO: 477-11-061-9 (Ministerio de Ciencia e Innovación) 860-11-195-X (Ministerio de Sanidad, Política Social e Igualdad)

Depósito Legal: SE-9457-2011

Imprime: GRAFITRES, S.L. - Utrera (Sevilla)

Este documento puede ser reproducido en todo o en parte, por cualquier medio, siempre que se cite explícitamente su procedencia

Aplicación de algoritmos genéticos y sistemas expertos en medicina asistencial

Aplicaciones clínicas de la inteligencia artificial

Application of genetic algorithms and expert systems in medical care. Clinical applications of artificial intelligence. *Executive abstract*

INFORMES DE EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS SANITARIAS
AETSA 2009 / 6

Conflicto de Interés

Los autores declaran que no tienen intereses que puedan competir con el interés primario y los objetivos de este informe e influir en su juicio profesional al respecto.

Índice

Índice de Tablas y Figuras	9
Resumen ejecutivo	13
Executive abstract	15
Introducción	17
La inteligencia artificial en el contexto de la computación	17
Algoritmos genéticos	19
Sistemas expertos	21
Otros conceptos relacionados con la IA	23
Objetivos	29
Material y métodos	31
Resultados	33
Discusión	37
Conclusiones	41
Referencias	43
Anexos	49

Índice de Tablas y Figuras

Figura 1.	Categorización por especialidades médicas	34
Tabla 1.	Artículos relacionados con inteligencia artificial en la asistencia clínica	35
Tabla 2.	Artículos relacionados con inteligencia artificial en la gestión sanitaria.	36

Abreviaturas

AG	Algoritmo genético
BDU	Base de datos de usuarios
e-Health	salud digital
GPS	<i>General Problem Solver</i>
HCE	Historia clínica electrónica
IA	Inteligencia artificial
IT	<i>Information technology</i>
PC	Ordenador personal
RNA	Red neuronal artificial
SE	Sistema experto
SIL	Sistema de información de laboratorio
SIR	Sistema de información de radiodiagnóstico
TICs	Tecnologías de la información y comunicación

Resumen ejecutivo

Título: Aplicación de algoritmos genéticos y sistemas expertos en medicina asistencial. Aplicaciones clínicas de la inteligencia artificial.

Autores: Javier Caballero Villarraso, Antonio R. Tabares, Francisco J. Gavi-lán León, Manuel Baena García, Francisco Javier Díez Vegas.

Antecedentes y justificación: La inteligencia artificial (IA) no equivale a la mera informatización. La IA es una ciencia que se ocupa del diseño de sistemas de computación capaces de mostrar características que asociamos a la inteligencia en el comportamiento humano: comprensión del lenguaje, razonamiento, aprendizaje y resolución de problemas, entre otros. Esto ha supuesto la aparición de numerosas herramientas de ayuda en oficios, trabajos y actividades de ámbitos muy diversos. Las biociencias no han sido una excepción, habiéndose proyectado la IA a múltiples aspectos de la medicina, como la investigación y asistencia clínica y la gestión sanitaria. De forma similar, la ingente cantidad de información emanada de pacientes y actuaciones sobre éstos, es susceptible de extracción del conocimiento procesable implícito en las bases de datos, bajo la perspectiva de distintas formas de IA o áreas afines a ésta. Esta aproximación se contextualizaría dentro del desarrollo informático en medicina, de la que serían ejemplos la historia clínica electrónica y las mejoras en las bases de datos de usuarios y en sistemas de información del laboratorio.

Objetivos: El presente estudio pretende identificar usos y utilidades de IA en medicina. De forma genérica, explorando la producción científica relacionada con IA en distintas especialidades o disciplinas médicas. Posteriormente, concretando el análisis documental en las correspondientes formas de IA en el ámbito de la asistencia clínica, así como en el de la gestión sanitaria.

Metodología: Estudio bibliométrico en la base de datos referencial MEDLINE, como aproximación a la proyección de la IA en la medicina asistencial. Las publicaciones fueron categorizadas según diversas formas de IA y vertientes afines o relacionadas en dos macroáreas específicas de la medicina: 1ª) la asistencia clínica; y, 2ª) la gestión sanitaria. También se realizó una división por especialidades médicas, a fin de conocer la proyección de la IA en las distintas disciplinas.

Resultados: Se recuperaron 3.787 artículos sobre utilidades de IA en asistencia clínica y gestión sanitaria. Los relacionados con asistencia (3.398 artículos) mostraron una frecuencia muy superior que los relacionados con gestión (398). De los documentos sobre asistencia clínica, los relativos a diagnóstico fueron los más estudiados (2.141 artículos) suponiendo un 63,17% dentro de su macroárea; los de gestión, se centraron más en el ámbito de la calidad de la asistencia sanitaria (316 artículos), siendo un 79,39% de su macroárea. Las formas de IA consideradas, mostraron patrones de distribución distintos en ambas macroáreas. Así, las redes neuronales fueron las que más producción científica (un 29%) mostraron en lo referente a asistencia clínica y en la gestión tuvieron una mayor representatividad las formas de simulación (27,8% los modelos de simulación y 23% la simulación asistida por computadora). También se recuperaron 5.605 artículos sobre utilización de IA en las distintas especialidades médicas. La más iterativa resultó ser oncología (1.240 artículos), seguida de neurología (986 artículos) y enfermedades cardiovasculares (793 artículos); la suma de estas tres especialidades supuso un 55% de los artículos en este sentido, mostrando el resto de especialidades una frecuencia muy inferior.

Conclusiones: La literatura sobre aplicaciones clínicas de la IA es muy abundante y crece exponencialmente. No se identifican formas de IA sistemáticamente implementadas en medicina asistencial. La literatura sobre IA en asistencia clínica y en gestión sanitaria muestra diferentes frecuencias en la distribución de las distintas formas de IA consideradas. En asistencia, el área más tratada es el diagnóstico y en la gestión, la calidad de atención sanitaria. Las especialidades más abordadas son oncología, neurología y enfermedades cardiovasculares.

Executive summary

Title: Application of genetic algorithms and expert systems in medical care. Clinical applications of artificial intelligence.

Authors: Javier Caballero Villarraso, Antonio R. Tabares, Francisco J. Gavi-lán León, Manuel Baena García, Francisco Javier Díez Vegas.

Background and rationale: Artificial intelligence (AI) is not equivalent to mere computerization. Artificial intelligence is a science that deals with the design of computer systems that are capable of displaying characteristics that we associate with intelligence in human behaviour: language comprehension, reasoning, learning and problem solving, among others. This has led to the appearance of numerous support tools in occupations, tasks and activities in a variety of areas. The biosciences have been no exception, with the application of AI to many aspects of medicine, such as research, clinical care and health management. Similarly, the vast amount of information emanating from patients and their treatments lends itself to input in databases for the extraction of embedded knowledge, from the perspective of different forms of AI or its affiliated areas. This approach is contextualized within IT development in medicine, some examples of which are electronic medical records and improvements in user databases and laboratory information systems.

Objectives: This study aims to identify AI applications in medicine. Generically, exploring the scientific production related to AI in different medical specialties or disciplines. Later, documentary analysis of the corresponding forms of AI will be specified in the spheres of clinical care and healthcare management.

Methodology: Bibliometric study in the MEDLINE database as an approach to the scope of AI in medical care. The publications were categorized according to various forms of AI and similar or related aspects in two specific macro-areas of medicine: 1) clinical care, and 2) healthcare management. A breakdown by medical specialty was also performed in order to determine the scope AI in different disciplines.

Results: There were 3787 articles retrieved on AI applications in clinical care and healthcare management; articles related to clinical care numbered 3398, with 398 associated with healthcare management. Of the documents on clinical care, those relating to diagnosis represented 2141 articles (63.17% of the macro-area). Those relating to healthcare management

focused more on the field of healthcare quality with 316 articles (79.39% of the macro-area). The forms of AI considered showed different distribution patterns in both macro-areas. Thus, neural networks represented most scientific production (29%) in terms of clinical care, and healthcare management was most represented by forms of simulation (27.8% simulation models and 23% computer aided simulation). Also, 5605 articles were recovered on the use of AI in various medical specialties. Most instances were found for oncology (1240 articles), followed by neurology (986 articles) and cardiovascular diseases (793 articles), with the sum of these three specialties accounting for 55% of the articles, with other specialties showing a much lower frequency.

Conclusions: The literature on clinical applications of AI is very abundant and is growing exponentially. No systematic implementation of AI in medical care was identified. The literature on AI in clinical care and healthcare management shows different frequencies in the distribution of the different forms of AI considered. In clinical care, diagnosis is the most represented area, and in healthcare management it is quality of care. The specialties most covered are oncology, neurology and cardiovascular diseases.

Introducción

En la época actual, el manejo rápido y preciso de la información representa un arma que permite el abordaje y solución de gran número y variedad de problemas, incluso aquellos que hasta hace poco se consideraban irresolubles. Esta revolución en el manejo de la información, se ha generado a partir del momento en que se dispone en diversos ámbitos de ordenadores o computadoras de alta velocidad. Las ciencias de la salud no son la excepción, por lo que los profesionales de la biomedicina también han avanzado en el conocimiento y manejo de datos mediante las ciencias computacionales, empleando éstas como un instrumento más, capaz de hacerlos superarse, optimizar su trabajo, y ser más competitivos (1-3).

Aunque la informática no trata exclusivamente sobre ordenadores, el avance de esta disciplina se apoya en buena medida en la utilización de dichos ordenadores en todos aspectos del manejo de información (1,2).

La **informática** es la disciplina que se encarga del estudio, creación y aplicación de métodos y técnicas para el almacenamiento, recuperación y empleo de la información en la resolución de problemas y toma de decisiones, mediante la utilización de ordenadores (2,3).

El empleo de computadoras se ha vuelto imprescindible debido a la cantidad de datos y la velocidad con que se deben analizar para obtener información. En su concepto moderno más amplio, la informática también incluye la teoría, diseño, fabricación y uso de los ordenadores (1,2,4).

Para entender los vínculos existentes entre la medicina y la informática, es importante analizar el avance del proceso de la información, que sucede de forma paralela al avance de los ordenadores debido a la necesidad de acelerar el procesamiento de los datos (4,5).

Desde una perspectiva más global, habría que comprender la relación entre la biomedicina y la ciencia de la **computación** o las ciencias computacionales (o sencillamente la computación), las cuales serían el estudio de los fundamentos teóricos de la información y el cómputo, así como las técnicas prácticas para sus implementaciones y aplicación en sistemas de cómputo (4-6).

La inteligencia artificial en el contexto de la computación

La inteligencia artificial (IA) es una ciencia que se ocupa del diseño de sistemas de computación capaces de mostrar características que asociamos

a la inteligencia en el comportamiento humano: comprensión del lenguaje, razonamiento, aprendizaje y resolución de problemas, entre otros (7-9).

Si bien su consolidación y, sobre todo, sus aplicaciones han experimentado un crecimiento exponencial en las dos últimas décadas (en gran medida, de la mano de los avances informáticos), la IA cuenta con más de medio siglo de historia. Así, habría que considerar en nacimiento real de la IA en 1950, cuando Norbet Wiener desarrolló el “principio de la retroalimentación”. Esta técnica consiste, por ejemplo, en la tecnología del termostato: comparar la temperatura actual del entorno con la deseada y, según los resultados, aumentarla o disminuirla. En 1955 Alan Newell y Herbert Simon desarrollan la “teoría de la lógica”; este desarrollo permitió crear un programa que exploraba la solución a un problema utilizando ramas y nudos, seleccionando únicamente las ramas que más parecían acercarse a la solución correcta del problema. Y es en 1956, en una conferencia en Vermont (EEUU), cuando John McCarthy propone el término “inteligencia artificial” para denominar al estudio de esta temática (8,9).

De este modo, la locución “inteligencia artificial” se ha ido extendiendo progresivamente para designar a una disciplina incluida dentro de las ciencias de la computación. Está relacionada con la actividad de numerosos científicos de distintos países, especialmente de los Estados Unidos y de Europa Occidental, los cuales han dirigido sus esfuerzos a dotar a los ordenadores de inteligencia. Si bien la expresión “dotar a las computadoras de inteligencia” puede resultar a priori poco fundamentada desde un prisma científico, tal postura puede ser razonada en relación al nivel de evidencia actualmente disponible (8-11).

Por un lado, podría entenderse de forma crítica que el ordenador, ordinariamente programado, no es más que un instrumento muy rápido y generalmente confiable capaz de hacer operaciones aritméticas o de manipular fichas de nombres en orden alfabético (o de ponerlas en tal orden). Para que un ordenador comience a merecer el nombre de inteligente, deberá ser capaz de realizar acciones que si fueran realizadas por un ser humano diríamos que requieren inteligencia, como por ejemplo desarrollar juegos que impliquen elección secuencial entre múltiples opciones condicionadas (como jugar al ajedrez) o mantener un diálogo con otro ser considerado también inteligente, o resolver algún rompecabezas (9,12,13).

Además, las palabras “inteligencia” y “artificial” pueden representar dos áreas contrapuestas e incluso dos conceptos incompatibles, como son el intelecto y las máquinas. Así, podría aseverarse que los ordenadores logran hacer operaciones aritméticas porque para eso sólo se necesita ser capaz de manipular números en forma mecánica; pero la inteligencia, a diferencia de la capacidad de manipular números, requiere creatividad, inventiva, iniciativa intelectual, y eso es propio de los seres humanos pero no de las má-

quinas. Los ordenadores pueden hacer lo que sus programadores les dicen, pero nada más; así mismo, hagan lo que hagan, nunca sabrán lo que están haciendo: nunca serán conscientes de sus actos (13-15,17).

De otro lado, la disciplina de la IA se ha desarrollado ya suficientemente como para ofrecer a la sociedad algunos instrumentos que mejoren su adaptación al medio ambiente: programas que se conocen con el nombre de sistemas expertos, cuya teoría y práctica son muy novedosas. Podemos decir pues, que su ejercicio por parte de los investigadores tiene como mira en muchos casos la fabricación de artefactos útiles, programas con habilidad especial para realizar funciones que con anterioridad sólo podíamos confiar a seres humanos. Esta clase de investigación se conoce como **IA de rendimiento** (16,17).

En cambio, a la disciplina que surgió (y aún perdura) en el ámbito investigador con otro propósito, como es el intento de comprender el funcionamiento de la inteligencia humana, se le denomina **IA de comprensión**. De este segundo tipo fue el trabajo realizado por dos de los pioneros de la disciplina, los ya citados A. Newell y H. Simon, en los años cincuenta y siguientes, que culminaron con la publicación de una importante obra sobre habilidad de solución de problemas en los seres humanos (18,19).

A la labor de estos dos investigadores se debe también la caracterización de los métodos de la inteligencia en dos categorías: débiles y fuertes; y el importante descubrimiento de que los métodos más generales de la inteligencia son por necesidad **métodos débiles**, y que los únicos **métodos fuertes** son los que aplican conocimientos específicos de un dominio particular (por lo que necesariamente deben carecer de generalidad). Este descubrimiento puede expresarse por una ley: a mayor generalidad, menor fuerza; y a mayor fuerza menor generalidad (20,21).

Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AG), fueron inventados en 1975 por John Holland, de la Universidad de Michigan (EE.UU.). Los AG consistirían básicamente en algoritmos de optimización, es decir, esquemas que tratan de encontrar la mejor solución a un problema dado entre un conjunto de opciones posibles. Los mecanismos de los que se valen los AG para llevar a cabo esa selección de entre las opciones disponibles pueden verse como una metáfora de los procesos de *evolución biológica* (22, 23).

A grandes rasgos, como ya se ha señalado, el AG es un método de optimización. De este modo, dada una función objetivo, el AG lleva a cabo una búsqueda en el espacio de soluciones intentando encontrar la solución

que minimiza dicha función objetivo. Por lo tanto, los AG están indicados para resolver todo tipo de dilemas que puedan ser expresados como un problema de optimización: bastaría con encontrar la representación adecuada para las soluciones y la función a optimizar (22,24).

Básicamente, los AG funcionan así: dada una *población* de soluciones, y en relación al valor de la función objetivo para cada una de los *individuos* (soluciones) de esa población, se seleccionan los mejores individuos (los que minimizan la función objetivo) y se combinan para generar otros nuevos. Este proceso se repite cíclicamente (22,24,25).

Como se pudo comprobar, el proceso es similar al que se da en la naturaleza: una serie de individuos compiten por su supervivencia; los mejor adaptados al medio (los que *optimizan la función objetivo*) sobreviven y tienen más posibilidades de aparearse, transmitiendo así parte de su material genético “mejor adaptado” a las generaciones siguientes. De esta manera, generación tras generación, la especie consigue una mayor y mejor adaptación al medio en el que vive (22-26).

Dado que los AG están inspirados en la evolución de las especies de la naturaleza, para comprender su funcionamiento es aconsejable conocer primero cómo funcionan los mecanismos evolutivos desde un punto de vista meramente biológico (22,25).

De entrada, hay que advertir que el primer factor clave en el proceso evolutivo es la presión selectiva que ejerce el medio sobre las poblaciones que lo habitan. Básicamente, ni el espacio vital ni el alimento son suficientes para todos, de modo que algunos individuos, concretamente aquellos más *débiles* (o más correctamente, los peor adaptados), tienen menos probabilidades de sobrevivir y de aparearse. Se genera así un mecanismo de selección que *filtra* el conjunto de la población. Este filtro, el de la *adaptación al medio*, permite seleccionar a aquellos individuos cuyas características se ajustan mejor a las vicisitudes que plantea la supervivencia en el entorno natural en el que se desarrolla su existencia. Así mismo, se desechan las “soluciones” inadecuadas, esto es, las características de los individuos no adaptados (22-26).

Se dijo antes que el primer factor clave en la evolución es la presión selectiva del medio. Pues bien, el segundo factor clave es la *información genética* y su *transmisión* entre generaciones. La *información genética*, codificada en el ADN, describe a un individuo concreto de forma completa, determinando las características que dicho individuo desarrollará a lo largo de su vida. De esta manera, el que un individuo se adapte o no al medio depende básicamente de la información contenida en su material genético. La *transmisión* de dicha información mediante la reproducción es la que articula el proceso evolutivo, el cual se vale de la *recombinación* del material genético aportado por los progenitores para “ensayar” nuevos conjuntos de

características, generando así una descendencia que hereda en lo posible todas aquéllas que resultan ventajosas (24,27).

De este modo, a lo largo de generaciones sucesivas, el material genético de los individuos mejor adaptados prevalece, generándose en cada ciclo reproductor individuos mejor adaptados, en promedio, que aquéllos de los que descienden (22-25,27).

Sistemas expertos

Los sistemas expertos (SE) como tales, surgen a mediados de los años sesenta; en esta época, se creía que bastaban unas pocas leyes de razonamiento junto con potentes ordenadores para producir resultados brillantes. Los primeros investigadores que desarrollaron programas basados en leyes de razonamiento fueron los ya aludidos Alan Newell y Herbert Simon, quienes desarrollaron el GPS (General Problem Solver). Este sistema era capaz de resolver problemas como el de las torres de Hanoi y otros similares, a través de la criptoaritmética. Sin embargo, este programa no podía resolver problemas más “cotidianos” y reales, como, por ejemplo, dar un diagnóstico médico (28-30).

Por ello algunos investigadores cambiaron el enfoque del problema, dirigiendo sus esfuerzos a resolver problemas sobre un área específica intentando simular el razonamiento humano. En vez de dedicarse a computarizar la inteligencia general, se centraron en *dominios de conocimiento* muy concretos. De esta manera nacieron los SE (30,31).

Básicamente, un SE es un *software* que imita el comportamiento de un experto humano en la solución de un problema. Pueden almacenar conocimientos de expertos para un campo determinado y solucionar un problema mediante deducción lógica de conclusiones. También podrían definirse como SE aquellos programas que se realizan haciendo explícito el conocimiento en ellos, que tienen información específica de un dominio concreto y que realizan una tarea relativa a este dominio.

Otro posible concepto de SE sería el de programas que contienen tanto *conocimiento declarativo* (hechos acerca de objetos, eventos y/o situaciones) como *conocimiento de control* (información acerca de los cursos de una acción), para emular el proceso de razonamiento de los expertos humanos en un dominio en particular y/o área de experiencia. De este modo, el *software* incorpora conocimiento de experto/s sobre un dominio de aplicación dado, de manera que es capaz de resolver problemas de relativa dificultad y apoyar la toma de decisiones inteligentes sobre la base de un proceso de razonamiento simbólico (30,32-34).

Las principales aplicaciones de los SE se observan en las gestiones empresariales debido a dos razones: 1ª) casi todas las empresas disponen de un ordenador que realiza las funciones básicas de tratamiento de la información: contabilidad general, decisiones financieras, gestión de la tesorería, planificación, etc.; 2ª) este trabajo implica manejar grandes volúmenes de información y realizar operaciones numéricas para después tomar decisiones, lo cual crea un terreno ideal para la implantación de los SE.

Además, los SE también se aplican en la contabilidad en apartados como: auditoría (es el campo en el que se están aplicando más SE) fiscalidad, planificación, análisis financiero y contabilidad financiera (28,30,31).

La *arquitectura básica* o *elementos* de un SE serían:

- 1. Base de conocimientos.** Es la parte del SE que contiene el conocimiento sobre el dominio. Hay que obtener el conocimiento del experto y codificarlo en la base de conocimientos. Una forma clásica de representar el conocimiento en un sistema experto son las reglas. Una *regla* es una estructura condicional que relaciona lógicamente la información contenida en la parte del antecedente con otra información contenida en la parte del consecuente.
- 2. Base de hechos (Memoria de trabajo).** Contiene los hechos sobre un problema que se han descubierto durante una *consulta*. Durante la citada consulta con el SE, el usuario introduce la información del problema actual en la base de hechos. El sistema empareja esta información con el conocimiento disponible en la base de conocimientos para deducir nuevos hechos.
- 3. Motor de inferencia.** El SE modela el proceso de razonamiento humano con un módulo conocido como el motor de inferencia. Dicho motor de inferencia trabaja con la información contenida en la base de conocimientos y la base de hechos para deducir nuevos hechos. Contrasta los hechos particulares de la base de hechos con el conocimiento contenido en la base de conocimientos para obtener conclusiones acerca del problema.
- 4. Subsistema de explicación.** Una característica de los SE es su habilidad para explicar su razonamiento. Usando el módulo del subsistema de explicación, un SE puede proporcionar una explicación al usuario de por qué está haciendo una pregunta y cómo ha llegado a una conclusión. Este módulo proporciona beneficios tanto al diseñador del sistema como al usuario. El diseñador puede usarlo para detectar errores y el usuario se beneficia de la transparencia del sistema.

- 5. Interfaz de usuario.** La interacción entre un SE y un usuario se realiza en lenguaje natural. También es altamente interactiva y sigue el patrón de la conversación entre seres humanos. Para conducir este proceso de manera aceptable para el usuario es especialmente importante el diseño de la interfaz de usuario. Un requerimiento básico de esta interfaz es la habilidad de hacer *preguntas*. Para obtener información fiable del usuario hay que poner especial cuidado en el planteamiento de las cuestiones. Esto puede requerir diseñar el interfaz utilizando menús o gráficos (30-34).

Otros conceptos relacionados con la IA

La **minería de datos** (o *data mining*) es el proceso de extraer información no trivial y potencialmente útil a partir de grandes conjuntos de datos disponibles en las ciencias experimentales (registros históricos de observaciones, reanálisis, simulaciones, etc.), proporcionando información en un formato legible que puede ser usada para resolver problemas de diagnóstico, clasificación o predicción. Tradicionalmente, este tipo de problemas se resolvían de forma manual aplicando técnicas estadísticas clásicas, pero el incremento del volumen de los datos ha motivado el estudio de técnicas de análisis automáticas que usan herramientas más complejas. Por lo tanto, la minería de datos identifica tendencias en los datos que van más allá de un análisis simple. Técnicas modernas de minería de datos (reglas de asociación, árboles de decisión, modelos de mezcla de Gaussianas, algoritmos de regresión, redes neuronales, máquinas de vectores soporte, redes bayesianas, etc.) se utilizan en ámbitos muy diferentes para resolver problemas de asociación, clasificación, segmentación y predicción (35,36).

Entre los diferentes algoritmos de minería de datos, los **modelos gráficos probabilísticos** (en particular las redes bayesianas) constituyen una metodología elegante y potente basada en la probabilidad y la estadística que permite construir modelos de probabilidad conjunta manejables que representan las dependencias relevantes entre un conjunto de variables (cientos de variables en aplicaciones prácticas). Los modelos resultantes permiten realizar inferencias probabilísticas de una manera eficiente. Por ejemplo, una red bayesiana podría representar las relaciones probabilísticas entre campos sinópticos de larga escala y registros de observaciones locales, proporcionando una nueva metodología de *downscaling* probabilístico: por ejemplo permite calcular una probabilidad $P(\text{observación}|\text{predicción de larga escala})$ (37).

Formalmente, una **red bayesiana** es un grafo dirigido acíclico cuyos nodos representan variables y los arcos (o pares ordenados) que los unen codifican dependencias condicionales entre las variables. El grafo proporciona una forma intuitiva de describir las dependencias del modelo y define una factorización sencilla de la distribución de probabilidad conjunta consiguiendo un modelo manejable que es compatible con las dependencias codificadas. Existen algoritmos eficientes para aprender modelos gráficos probabilísticos a partir de datos, permitiendo así la aplicación automática de esta metodología en problemas complejos. Las redes bayesianas que modelizan secuencias de variables (por ejemplo, series temporales de observaciones) se denominan redes bayesianas dinámicas. Una generalización de las redes bayesianas que permiten representar y resolver problemas de decisión con incertidumbre son los *diagramas de influencia* (38,39).

Por otra parte, una **red neuronal** es un modelo no lineal, inspirado en el funcionamiento del cerebro, que es diseñada para resolver una gran variedad de problemas. Una red neuronal artificial (RNA) es un sistema de procesamiento de información que tiene ciertas aptitudes en común con las redes neuronales biológicas:

- El procesamiento de información ocurre en muchos elementos simples llamados neuronas.
- Las señales son transferidas entre neuronas a través de enlaces de conexión.
- Cada conexión tiene un peso asociado, el cual, típicamente, multiplica a la señal transmitida.
- Cada neurona aplica una función de activación (usualmente no lineal) a su entrada de red (suma de entradas pesadas) para determinar su salida (40,41).

La **simulación** es la experimentación con un modelo de una hipótesis o un conjunto de hipótesis de trabajo. A grandes rasgos, consiste en la representación de un proceso o fenómeno mediante otro más simple, que permite analizar sus características (42).

También se puede entender la simulación como una técnica que imita el funcionamiento de un sistema del mundo real cuando evoluciona en el tiempo. Esto se hace por lo general al crear un modelo de simulación. En síntesis, cada modelo o representación de una cosa es una forma de simulación. La simulación es un tema amplio complejo que es muy importante para los responsables del diseño de sistemas, así como para los responsables de su operación.

Shannon define la simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con él para entender el com-

portamiento del sistema o evaluar varias estrategias (dentro de los límites impuestos por un criterio o por un conjunto de criterios) para la operación del sistema. Por lo que se entiende que el proceso de simulación incluye tanto la construcción del modelo como su uso analítico para estudiar un problema. Un **modelo de simulación** comúnmente toma la forma de un conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema, expresado con relaciones matemáticas o lógicas entre los objetos de interés del sistema. En contraste con las soluciones matemáticas exactas disponibles en la mayoría de los modelos analíticos, el proceso de simulación incluye la ejecución del modelo a través del tiempo, en general en una computadora, para generar muestras representativas de las mediciones del desempeño o funcionamiento. En este aspecto, se puede considerar a la simulación como un experimento de muestreo acerca del sistema real, cuyos resultados son puntos de muestra. Por ejemplo, para obtener la mejor estimación del promedio de la medición del funcionamiento, calculamos el promedio de los resultados de muestra. Es claro que tanto más puntos de muestra generemos, mejor será nuestra estimación. Sin embargo, hay otros factores que tienen influencia sobre la bondad de nuestra estimación final, como las condiciones iniciales de la simulación, la longitud del intervalo que simula y la exactitud del modelo mismo (42,43).

La simulación es una técnica muy poderosa y ampliamente usada en las ciencias para analizar y estudiar sistemas complejos. En investigación se formulan modelos que se resuelven de forma analítica. En casi todos estos modelos la meta es determinar soluciones óptimas. Sin embargo, debido a la complejidad, las relaciones estocásticas, etc., no todos los problemas del mundo real se pueden representar adecuadamente en forma de modelo. Cuando se intenta utilizar modelos analíticos para sistemas como éstos, en general necesitan de tantas hipótesis de simplificación que es probable que las soluciones no sean buenas, o bien, sean inadecuadas para su realización. En estos casos, con frecuencia la única opción de modelado y análisis de que dispone quien toma decisiones es la simulación. Simular, es reproducir artificialmente un fenómeno o las relaciones entrada-salida de un sistema. Esto ocurre siempre cuando la operación de un sistema o la experimentación en él son imposibles, costosas, peligrosas o poco prácticas, como en el entrenamiento de personal de operación, pilotos de aviones, etc (42-44).

Si esta reproducción artificial está basada en la ejecución de un programa informático en una computadora, entonces la simulación se llama digital y usualmente se conoce como **simulación por computador**, aunque esto incluye la simulación en las computadoras analógicas. La simulación por computadora está relacionada con los simuladores. Por *simulador* entendemos no sólo un programa de simulación y la computadora que lo realiza, sino también un aparato que muestra visualmente y a menudo fí-

sicamente las entradas y salidas (resultados) de la simulación, como es el caso de los simuladores profesionales de vuelo, aunque en este curso no se hablará sobre los simuladores ni sobre la simulación analógica. A partir del advenimiento de las computadoras electrónicas, la simulación ha sido una de las herramientas más importantes y útiles para analizar el diseño y operación de complejos procesos o sistemas. Una definición academicista del vocablo “simular” sería “fingir, llegar a la esencia de algo prescindiendo de la realidad” (43,45).

En esta línea, la simulación por computador también podría definirse como una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos períodos (45).

La **lógica difusa** o **lógica heurística** (o *fuzzy logic*) se basa en lo relativo a lo observado. Este tipo de lógica toma dos valores aleatorios, pero contextualizados y referidos entre sí. La lógica difusa tiene sus raíces en la teoría de conjuntos difusos desarrollada por Zadeh en la década de los 60, la que propone que un elemento siempre pertenece en un cierto grado a un conjunto y nunca pertenece del todo al mismo, esto permite establecer una manera eficiente para trabajar con incertidumbres, así como para acondicionar el conocimiento en forma de reglas hacia un plano cuantitativo, factible de ser procesado por computadores. Así, mientras la lógica clásica considera la inclusión o exclusión con los valores 0 (falso) y 1 (verdadero), la lógica difusa en vez de trabajar con el clásico concepto de inclusión o exclusión, introduce una función que expresa el grado de “pertenencia” de una variable hacia un atributo o “variable lingüística” tomando valores interpolados en el rango de 0 a 1. La principal ventaja de utilizar términos lingüísticos como: “a medias”, “bastante”, “casi”, “un poco”, “mucho”, “algo”, etc., está en que permite plantear el problema en los mismos términos en los que lo haría un experto humano (46,47).

Contexto y justificación del informe

El progresivo avance de la informática ha supuesto un impacto determinante en la sociedad. Así, el continuo desarrollo de los ordenadores tanto en capacidad de éstos como en los métodos de programación, también ha incidido de forma crucial en múltiples ámbitos y especialidades de la medicina clínica. Ejemplos destacables son la historia clínica electrónica (HCE) o digital y las mejoras en las bases de datos de usuarios (BDU) y en los

sistemas de información del laboratorio (SIL), entre otros. Éstos permiten registrar información relativa a datos del enfermo (datos demográficos, antropométricos, analíticos...), del personal sanitario y las actuaciones realizadas por éste, etc. Consecuencia de ello, es la generación de una ingente cantidad de información, susceptible de ser almacenada y procesada.

En este contexto, distintas formas de IA se han ido proyectando en diversa medida en la asistencia clínica diaria, yendo desde reglas simples (como emisión de alarmas ante valores clínicos o analíticos anómalos), reglas expertas (atendiendo a la oscilación de un valor en comparación con valores previos, más que al valor neto de forma aislada) o formas más complejas (resultado de conjugar distintos valores de diversos parámetros en diferentes condiciones). Estas formas complejas corresponderían al desarrollo de AG, SE u otras formas de IA o aspectos relacionados, ideados como herramientas de ayuda en la detección precoz de formas asintomáticas o subclínicas de enfermedad, en la toma de decisiones diagnósticas, terapéuticas y/o de gestión sanitaria, para predecir y analizar tendencias evolutivas, etc.

Por todo esto, el presente informe pretende identificar cuáles son las formas de IA ya implementadas y explorar qué cantidad de investigación aplicada se está produciendo sobre IA y áreas afines en medicina clínica. En este sentido, también se pretende caracterizar dicha investigación en función de las especialidades médicas en las que se han centrado, procediendo a un análisis pormenorizado de las formas de IA empleadas o estudiadas en asistencia clínica y gestión sanitaria.

Objetivos

1. Conocer si actualmente se emplea de algún modo la inteligencia artificial (IA) en el ámbito de la medicina asistencial y, en este caso, enunciar las formas de IA y la utilidad clínica de las mismas.
2. Explorar posibles proyecciones de la IA en la práctica clínica a corto-medio plazo y describirlas.

Estos objetivos generales se concretan en cuatro objetivos específicos:

- Identificar las publicaciones de investigación aplicada sobre IA y áreas relacionadas en biomedicina.
- Cuantificar las citadas publicaciones de forma absoluta y relativa, en función de las áreas de conocimiento médico o especialidades en las que se centra o se pretende proyectar la IA en alguna de sus vertientes.
- Enunciar formas de IA que se encuentren en fase de aplicación a la práctica clínica o próxima a ella.
- Describir la literatura científica sobre la que se fundamenta el desarrollo de las mencionadas formas de IA, en dos ámbitos específicos: 1º) asistencia clínica; 2º) gestión sanitaria.

Material y Métodos

El estudio se orientó a cubrir los objetivos expuestos en el apartado anterior, partiendo de un estudio bibliométrico como aproximación global al impacto de la IA en medicina clínica.

La finalidad del citado estudio bibliométrico ha sido explorar los contenidos y la evolución de la investigación aplicada sobre IA en relación al ámbito sanitario. El concepto de investigación aplicada que se ha usado aquí es aquella que pueda traducirse en un plazo corto o medio en aplicaciones a la práctica clínica.

A tal efecto, se ha procedido a realizar una categorización pormenorizada por subapartados distinguiendo dos ámbitos o macro-áreas de conocimiento: la gestión sanitaria y la asistencia clínica (incluyendo en ésta tanto a la rutina asistencial como la investigación clínica y traslacional).

De otro lado, se realizó una clasificación global por materias o especialidades médicas.

El periodo de tiempo abarcado fue de enero de 1986 a diciembre de 2010, no habiendo limitación por idioma. Se incluyeron todos los documentos que atendieran el uso de la IA en ciencias de la salud: informes de evaluación, guías de la práctica clínica, revisiones sistemáticas, documentos de consenso, revisiones narrativas, ensayos clínicos, estudios de casos y controles y series de casos. También fueron considerados los estudios descriptivos acerca de propuestas metodológicas o modelos teóricos no probados en escenarios reales, tales como diseños o esquemas de procedimientos. Se excluyeron editoriales y cartas al director, así como todos los documentos fundamentados u orientados esencialmente a especies animales.

Estudio bibliométrico

Dado que la finalidad de este estudio era identificar investigación sobre formas de IA en una fase que pudiera estar cercana a la aplicación de las mismas en la práctica asistencial, la búsqueda bibliográfica se orientó a localizar aportaciones de las citadas formas de IA en las áreas de apoyo al diagnóstico clínico de enfermedades (laboratorios sanitarios y servicios de diagnóstico por imagen), de pronóstico evolutivo, de toma de decisiones en esquemas diagnósticos y/o terapéuticos, o de actividades relacionadas con la administración sanitaria. En todos estos apartados, se realizó una clasificación detallada de la forma específica de IA que abordaba el documento de forma esencial; así, en el supuesto caso de citarse más de una vertiente

de IA, se catalogaba según la forma o característica principal sobre la que versaba el documento en cuestión, de forma que un mismo documento no fuera incluido en más de una categoría.

Se efectuó inicialmente una búsqueda para la localización de informes de agencias de evaluación, guías de la práctica clínica y revisiones sistemáticas. A tal fin, las fuentes consultadas fueron:

- Red Internacional de Agencias de Evaluación (INAHTA).
- Cochrane Library (2006, Issue 2).
- National Guideline Clearinghouse.
- Sitios WEB de agencias no incluidas en INAHTA y de instituciones internacionales y proveedores que elaboran informes para sus sistemas sanitarios, como Blue Cross and Blue Shield Association-Technology Evaluation Center, Institute for Clinical Evaluative Services (ICES), Medical Advisory Secretariat (MAS), National Institute of Clinical Excellence (NICE), y otros.

Tras ello, se realizó una búsqueda en la base de datos referencial MEDLINE elaborando a tal efecto una estrategia de búsqueda bibliográfica que queda detallada en el Anexo 1. La distribución según apartados se estableció tras ser analizados manualmente los documentos recuperados.

Las formas de IA consideradas fueron: redes neuronales, redes bayesianas, modelos de simulación, simulación por computador, lógica difusa, sistemas expertos y algoritmos genéticos.

La clasificación de los aspectos relacionados con la asistencia clínica se realizó en orden a tres grandes bloques: diagnóstico (subdividiendo en distintos campos relacionados con laboratorio o con diagnóstico por imagen), toma de decisiones (diagnósticas y terapéuticas) y pronóstico.

Las categorías concernientes a la gestión sanitaria fueron: sistemas de información y gestión de usuarios, administración de servicios y recursos sanitarios y calidad de la atención sanitaria; esta última se subdividió en planes de calidad en atención sanitaria, evaluación de procesos y resultados, indicadores de calidad en atención sanitaria y satisfacción del usuario.

Por otro lado, se procedió a ordenar la producción científica recuperada según su correspondencia a distintas especialidades médicas, a fin de explorar qué áreas de la medicina o grupos de patologías son los más considerados en el desarrollo de formas de IA. Para esto, a la estrategia de búsqueda inicial se añadió una fórmula de división que se detalla en el Anexo 2.

Resultados

Se observó un crecimiento exponencial de la producción científica relacionada con la IA desde todos sus ámbitos: tanto por especialidades médicas, como por subcategorías o formas de IA, como considerando las macroáreas relacionadas con el apoyo a la asistencia clínica y a la gestión sanitaria.

No se hallaron informes de evaluación, ni guías de la práctica clínica, ni revisiones sistemáticas.

Tras la búsqueda en la base de datos referencial MEDLINE, se recuperaron 3.788 artículos relacionados con la utilización de IA en las dos macroáreas anteriormente aludidas. De éstos, 3.389 pertenecían al ámbito de la asistencia clínica y 399 al de la gestión sanitaria.

En lo relativo a la asistencia clínica (Tabla 1), el área de diagnóstico fue la más estudiada representando un 63,17% del total (2.141 artículos), seguida de la toma de decisiones con un 25,05% (849 artículos) y del pronóstico clínico con un 11,77% (399 artículos). Atendiendo a las formas de IA, la más abordada fueron las redes neuronales, suponiendo en torno a un 30%. La que menos artículos supuso eran las redes bayesianas con un 5%. El resto de formas ofrecieron proporciones similares (cada una de ellas entre un 12 y un 14% del total).

En cuanto a la gestión sanitaria (Tabla 2), la gran mayoría de artículos pertenecieron a la calidad sanitaria llegando a ser un 79,99%. Los sistemas de información supusieron un 19,04% y la administración de servicios y recursos sanitarios un 1,75%. De los subgrupos incluidos en el apartado de calidad sanitaria, la más señalada fue la evaluación de procesos y resultados (71,17%), seguida de los planes de calidad (5,76%), la satisfacción del usuario (2%) y, por último, los indicadores de calidad en la atención sanitaria (0,25%). Considerando las formas de IA en el conjunto total de artículos relacionados con la gestión sanitaria, las más estudiadas fueron los modelos de simulación (27,81%), seguida de las redes neuronales (25,06%), la simulación por computadora (23,55%), los sistemas expertos (14,28%), las redes bayesianas (4,01%), los algoritmos genéticos (3%) y, finalmente, la lógica difusa (2,25%).

Para la clasificación por especialidades médicas referida en el Anexo 2, se recuperaron 5605 artículos. La disciplina más reiterada fue la oncología (1.240 artículos), seguida de la neurología (986 artículos), la patología cardiovascular (793 artículos). La suma de estas tres supuso un 55% de los artículos en este sentido, mostrando el resto de especialidades una frecuencia marcadamente inferior, como se observa en la Figura 1.

Figura 1: Categorización por especialidades médicas

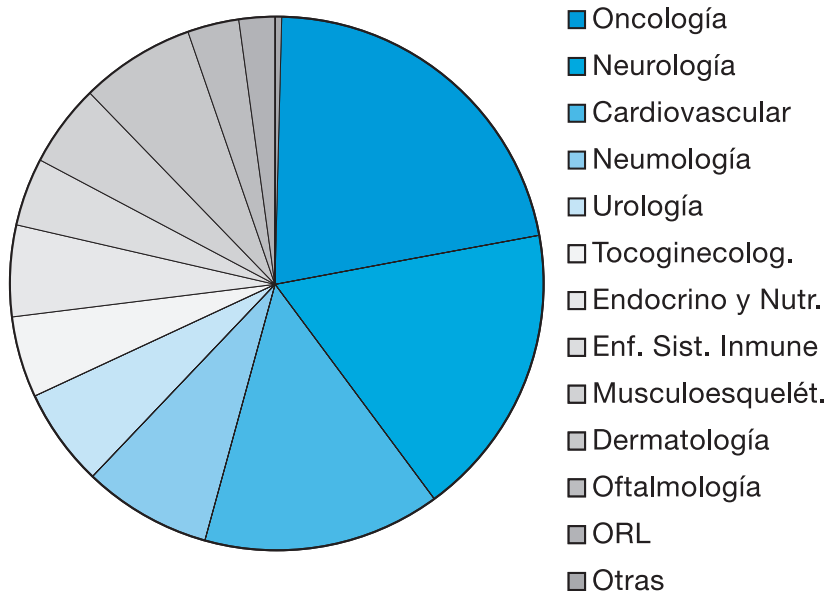


Tabla 1. Artículos relacionados con inteligencia artificial en la asistencia clínica									
ÁREA	Redes Neuronales	Redes Bayesianas	Modelos de Simulación	Simulación por Computadora	Lógica Difusa	Sistemas Expertos	Algoritmos Genéticos	TOTAL	
Diagnóstico (2.141)	Laboratorio Clínico	148	12	65	31	21	17	315	
	Sist. Información Laboratorio	1	0	0	0	1	0	7	
	Anatomía Patológica	216	47	57	81	108	120	727	
	Diagnóstico por imagen	321	50	118	82	176	181	1081	
	Sist. Información Radiodiagnóstico	2	0	0	0	2	0	11	
Toma de decisiones (849)	Propuesta diagnóstica	171	22	28	63	83	89	531	
	Propuesta terapéutica	81	16	24	43	52	54	318	
Pronóstico (399)	Previsión evolutiva	72	27	108	120	19	17	399	
TOTAL	1012	174	400	420	462	443	478	3389	

En la primera columna se distinguen las tres áreas asistenciales consideradas, constando entre paréntesis el total de cada una.

Tabla 2. Artículos relacionados con inteligencia artificial en la gestión sanitaria.									
ÁREA	Redes Neuronales	Redes Bayesianas	Modelos de Simulación	Simulación por Computadora	Lógica Difusa	Sistemas Expertos	Algoritmos Genéticos	TOTAL	
Sistemas de información y gestión de usuarios	9	4	9	16	0	38	0	76	
Administración de servicios y recursos sanitarios	2	2	1	1	1	0	0	7	
Planes de calidad en atención sanitaria	3	0	9	8	0	3	0	23	
Evaluación de procesos y resultados	83	10	88	68	8	15	12	284	
Indicadores calidad atención sanitaria (Total: 316)	1	0	0	0	0	0	0	1	
Satisfacción del usuario	2	0	4	1	0	1	0	8	
TOTAL	100	16	111	94	9	57	12	399	

Discusión

Lo más destacable del presente estudio es la existencia de una ingente producción científica de la literatura científica del área de la inteligencia artificial, en general, así como la que está específicamente relacionada con la proyección de esta al ámbito de las ciencias de la salud y, concretamente, a la medicina clínica. La aludida producción científica muestra un crecimiento exponencial en las dos últimas décadas y en el momento actual aún sigue en ascenso.

Tal hecho estaría en sintonía con el impacto social que ha supuesto el desarrollo de las ciencias computacionales y, en un sentido más amplio, de la tecnología. De este modo, la introducción de la TICs o Tecnologías de la Información y Comunicación (y no ya sólo de la informática) han dejado su impronta en numerosas áreas biomédicas. Ejemplo de ello sería la introducción de la telemedicina para la asistencia clínica urgente o programada, o el empleo de formas de domótica en centros sanitarios (48,49).

Por tanto, habría que entender los hallazgos del presente estudio en el contexto social del momento desde un prisma global, antes que desde el prisma específico de la medicina en lo que ha venido a denominarse la era de la “e-salud” o salud digital (48,50).

Sin embargo, pese a la antigüedad de este tema, no se han recuperado informes de evaluación, ni revisiones sistemáticas. De forma análoga, los artículos no referían formas que en la actualidad estén instauradas de forma generalizada en medicina asistencial, ni implementadas rutinariamente en regiones o sistemas sanitarios concretos. Más bien trataban de fórmulas innovadoras para la resolución de problemas en escenarios reales o teóricos. Se halló un estudio bibliométrico relacionado con el presente trabajo, pero no fue recuperado para su inclusión en él al no poderse incardinar en el objeto de estudio del mismo. En él se analizaba la producción científica correspondiente al área de la bioinformática y de la informática médica en general, quedando excluida la IA en cualquiera de sus formas (51).

Atendiendo a las dos macroáreas en que se ha centrado el estudio bibliométrico, la de gestión sanitaria ha supuesto la décima parte de artículos que la correspondiente a asistencia clínica. Esta proporción está en lógica correspondencia con la literatura global relacionada con estas dos macroáreas, por lo que la IA no supone por tanto una excepción a dicha proporción.

Sí resultan diferencias al observar la distribución de los documentos recuperados en relación a la asistencia clínica y a la gestión sanitaria al clasificarlos según las formas de IA consideradas.

En ambos ámbitos, los artículos sobre redes neuronales son especialmente numerosos. En la asistencia clínica son los más frecuentes, suponiendo un 29% del total, seguidos muy de lejos por los relacionados con algoritmos genéticos (14%). En la gestión sanitaria han sido los segundos en frecuencia, con un 25,06%, detrás de los artículos sobre modelos de simulación (27,81%) y delante de los de simulación asistida por computadora (23,55%).

Puede resultar difícil interpretar estos datos. Podría inferirse que, partiendo de la filosofía de estas distintas formas de IA, las fórmulas orientadas a la resolución de problemas concretos es la principal motivación de la introducción de IA en medicina.

Las fórmulas de simulación tienen mayor frecuencia en la gestión sanitaria, mientras que las fórmulas de optimización (sistemas expertos y algoritmos genéticos) tienen mayor presencia en la asistencia clínica, en especial en lo relacionado con los laboratorios de anatomía patológica y los servicios de diagnóstico por imagen.

En este sentido, se observa que las distintas formas de IA presentan frecuencias similares en relación a los laboratorios de anatomía patológica y a los servicios de diagnóstico por imagen, lo cual es lógico si se piensa que la anatomía patológica, en definitiva trabaja con imágenes microscópicas. Si se unen ambas áreas asistenciales (anatomía patológica y diagnóstico por imagen), puede comprobarse que el 53% de los artículos del ámbito de la asistencia clínica se incluirían en ellas. De forma aislada, los concernientes a diagnóstico por imagen supondrían un 32,2%. En definitiva, el estudio de imágenes médicas genera la mayor parte de la literatura relacionada con utilidades de IA en medicina.

En líneas generales, los campos de la medicina con más producción científica son las que tradicionalmente utilizan recursos informáticos en su quehacer desde más tiempo atrás y, actualmente, en mayor grado desde el punto de vista cuantitativo. Se entiende pues que desde el punto de vista cualitativo, dichas áreas son las que van en avanzadilla en la investigación y, a veces, implementación de formas de IA.

Sin embargo, si bien el diagnóstico por imagen ocupa un primer lugar en términos cuantitativos absolutos, las tecnologías de laboratorio clínico aparecen con anterioridad, considerando la cronología de las publicaciones (52).

Así, las primeras formas o esquemas básicos de inteligencia artificial pertenecerían al área del laboratorio clínico. Dichas formas, de inicio fueron sistemas ópticos para la captura de datos correspondientes a solicitudes analíticas. Hoy días, de hecho, no se entiende la rutina de un laboratorio clínico en ausencia de equipos de identificación óptica de muestras biológicas, habitualmente mediante códigos de barras (52,53).

Las primeras aplicaciones de inteligencia artificial compleja pertenecerían también al mundo del laboratorio. No podrían hablarse en sí de sistemas expertos, sino de reglas expertas, como formas elementales de los primeros. Un ejemplo de ello sería la estructuración de rangos de validación técnica y validación clínica, la emisión de comentarios estandarizados ante la transgresión de ciertos niveles analíticos considerados patológicos, o el programar la medición de magnitudes bioquímicas adicionales en función de los valores que surjan en las magnitudes analizadas (52-55).

Continuando con la cronología de los artículos recuperados en el presente trabajo, se observa que los relacionados con el estudio de imágenes médicas son más recientes (se concentran en la última década). Puede pensarse que son más modernos los procedimientos de procesamiento de imágenes habida cuenta del gran consumo de recursos informáticos que precisa trabajar con imágenes, en términos de memoria y velocidad de proceso. Por ello, hasta llegar a poder disponer de archivos de imágenes y programas de manipulación de las mismas, se ha requerido de la existencia de equipos informáticos muy potentes con respecto a otros ámbitos. Quizá en virtud de tales requerimientos, gran cantidad de la investigación en torno a la utilidad de la IA en las imágenes médicas, están dirigidas a la optimización de recursos. Con ello, se han desarrollado fórmulas para facilitar la visualización e interpretación de las imágenes y, de este modo, establecer diagnósticos más precisos y/o con mayor facilidad. Esto, añadido a la posibilidad de almacenamiento de datos (a fin de disponer de archivos históricos personales de pacientes, al igual que en el laboratorio), ha simplificado en gran medida la labor del personal sanitario (56-58).

También en términos generales, el ámbito de la gestión sanitaria ha sido el más tardío en mostrar publicaciones relacionadas con IA. Esto puede igualmente estar en sintonía con que ésta es un área joven, en los términos en que hoy día se entiende. No obstante, cabe reseñar que su crecimiento ha sido muy notorio, en especial si se considera su representatividad en el conjunto de toda la investigación biomédica. Tal hecho podría estar en relación con el progresivo desarrollo de las políticas y planes de salud, el mayor crecimiento de formas de aproximación a la epidemiología y, en especial, la aplicación de programas de control de calidad sanitario.

De este modo, la generación de datos procedentes de múltiples ítems de ámbito de la calidad sanitaria, en conjunción con factores epidemiológicos y otras variables clínicas, ha dado origen a ingentes cantidades de información, susceptible de ser analizada y procesada. Fruto de ello han resultado formas básicas de IA como los esquemas de priorización de asistencia sanitaria en función de la gravedad de la patología del enfermo, tanto de forma urgente, como en programaciones de ingresos, como en organización de intervenciones quirúrgicas, etc. (59,60).

En cuanto a las especialidades médicas de más desarrollo en el ámbito de la IA, puede interpretarse que éstas corresponden a las disciplinas que generan mayor cantidad de investigación en sí. Tal sería el caso del claro protagonismo de la oncología.

Pero también puede pensarse en la mayor frecuencia de ciertas especialidades en función de que se trate de áreas que tradicionalmente se han beneficiado más de los recursos informáticos en la investigación y estudio de las patologías por ellas asistidas. Tal sería el caso de lo observado en la neurología y áreas afines pues desde sus orígenes, la informática ha sido un referente continuo a la hora de estudiar el funcionamiento del sistema nervioso (sobre todo el sistema nervioso central) y, más concretamente, a la hora de analizar el comportamiento humano y otras funciones cerebrales superiores tanto en estado de actividad normal como patológica. De forma recíproca, estas especialidades han servido muchas veces como modelo a la hora de idear el desarrollo de múltiples formas de IA (61,62).

A modo de conclusión, podrá afirmarse que los avances de la IA son consecuencia del desarrollo global de la tecnología y, más globalmente, de la sociedad. De este modo, el mayor avance de la informática, haciendo posible disponer de ordenadores más potentes en capacidad y de mejores métodos de programación ha posibilitado, entre otros muchos factores, el desarrollo de la IA.

Pero habría que considerar que la IA no es sólo una consecuencia de los avances en los recursos tecnológicos que la sustentan, sino que también obedece a las necesidades de las áreas en que se aplica y a las cuales intenta dar respuesta.

Ejemplo demostrativo de lo expuesto podrían ser los adelantos en biotecnología, concretamente en las áreas relacionadas con la genómica y la proteómica. Las plataformas de secuenciación masiva del genoma, los estudios pangenómicos, como otras fuentes de obtención de datos del genoma y el proteoma de los seres vivos, ha hecho necesario recurrir a mejores recursos informáticos. Es así como ha surgido la bioinformática y sus áreas relacionadas (63,64).

En consecuencia, el desarrollo de las bases de datos bioinformáticas como las diferentes formas de estudio o aproximación a las mismas, han conllevado la aparición de distintas formas de IA que optimicen y faciliten dichas aproximaciones (65).

Conclusiones

1. La literatura sobre aplicaciones de la IA en medicina es muy abundante y ha evidenciado un crecimiento exponencial en las dos últimas décadas, prosiguiendo actualmente en ascenso.
2. No se han identificado aplicaciones de IA instauradas de forma generalizada en medicina asistencial, ni implementadas rutinariamente en regiones o sistemas sanitarios concretos.
3. Existe una ingente producción científica relacionada con la IA en asistencia clínica y en gestión sanitaria. Las formas de IA estudiadas muestran frecuencias diferentes en estas dos macroáreas.
4. En la asistencia clínica, los artículos corresponden con mayor asiduidad al área de diagnóstico y en la gestión sanitaria la gran mayoría se incluyen en el área de la calidad de atención sanitaria.
5. Las especialidades médicas que muestran más producción científica en relación a la IA son la oncología, la neurología y las enfermedades cardiovasculares.

Referencias

1. Szolovits P, Patil RS, Schwartz WB. Artificial intelligence in medical diagnosis. *Ann Intern Med.* 1988; 108:80-7.
2. Achacoso TB, Yamamoto WS. *Perspect Biol Med.* Artificial ethology and computational neuroethology: a scientific discipline and its subset by sharpening and extending the definition of artificial intelligence. 1990; 33:379-89.
3. Mural RJ, Einstein JR, Guan X, Mann RC, Uberbacher EC. An artificial intelligence approach to DNA sequence feature recognition. *Trends Biotechnol.* 1992; 10:66-9.
4. Thompson E. Symbol grounding: a bridge from artificial life, to artificial intelligence. *Brain Cogn.* 1997; 34:48-71.
5. Husbands P, Harvey I, Cliff D, Miller G. Artificial evolution: a new path for artificial intelligence? *Brain Cogn.* 1997; 34:130-59.
6. Persidis A, Persidis A. Artificial intelligence for drug design. *Nat Biotechnol.* 1997; 15:1035-6.
7. Petot GJ, Marling C, Sterling L. An artificial intelligence system for computer-assisted menu planning. *J Am Diet Assoc.* 1998; 98:1009-14.
8. Bell AJ. Levels and loops: the future of artificial intelligence and neuroscience. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* 1999; 354:2013-20.
9. Marshall BE. Artificial intelligence applications in the intensive care unit. *Hanson CW 3rd, Crit Care Med.* 2001; 29:427-35.
10. Stefanelli M. The socio-organizational age of artificial intelligence in medicine. *Artif Intell Med.* 2001; 23:25-47.
11. Narayanan A, Keedwell EC, Olsson B. Artificial intelligence techniques for bioinformatics. *Appl Bioinformatics.* 2002; 1:191-222.
12. Ramesh AN, Kambhampati C, Monson JR, Drew PJ. Artificial intelligence in medicine. *Ann R Coll Surg Engl.* 2004; 86:334-8.
13. Laghaee A, Malcolm C, Hallam J, Ghazal P. Artificial intelligence and robotics in high throughput post-genomics. *Drug Discov Today.* 2005; 10:1253-9.
14. Flouris AD, Duffy J. Applications of artificial intelligence systems in the analysis of epidemiological data. *Eur J Epidemiol.* 2006; 21:167-70.

15. Norwitz ER. Artificial intelligence: can computers help solve the puzzle of parturition? *Am J Obstet Gynecol.* 2006; 194:1510-2.
16. Duch W, Swaminathan K, Meller J. Artificial intelligence approaches for rational drug design and discovery. *Curr Pharm Des.* 2007; 13:1497-508.
17. Cooper RA, Ding D, Grindle GG, Wang H. Personal mobility and manipulation using robotics, artificial intelligence and advanced control. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2007; 2007:4368-71.
18. Karlsson D, Forsum U. Medical decision-support systems and the concept of context. *Med Inform Internet Med.* 2004; 29:109-18.
19. Shao L, Zhang H, de Haan G. An overview and performance evaluation of classification-based least squares trained filters. *IEEE Trans Image Process.* 2008; 17:1772-82.
20. Kroeker KL. Seeing data: new methods for understanding information. *IEEE Comput Graph Appl.* 2004; 24:6-12.
21. Bellazzi R, Sacchi L, Concaro S. Methods and tools for mining multivariate temporal data in clinical and biomedical applications. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2009; 2009:5629-32.
22. Sumida BH, Houston AI, McNamara JM, Hamilton WD. Genetic algorithms and evolution. *J Theor Biol.* 1990; 147:59-84.
23. Forrest S. Genetic algorithms: principles of natural selection applied to computation. *Science.* 1993; 261:872-8.
24. Srinivas M, Patnaik LM. On modeling genetic algorithms for functions of unitation. *IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern.* 1996; 26:809-21.
25. McNay D, Michielssen E, Rogers RL, Taylor SA, Akhtari M, Sutherland WW. Multiple source localization using genetic algorithms. *J Neurosci Methods.* 1996; 64:163-72.
26. Park LJ, Park CH, Park C, Lee T. Application of genetic algorithms to parameter estimation of bioprocesses. *Med Biol Eng Comput.* 1997; 35:47-9.
27. Helaers R, Milinkovitch MC. MetaPIGA v2.0: maximum likelihood large phylogeny estimation using the metapopulation genetic algorithm and other stochastic heuristics. *BMC Bioinformatics.* 2010; 11:379.
28. Sandell HS, Bourne JR. Expert systems in medicine: a biomedical engineering perspective. *Crit Rev Biomed Eng.* 1985; 12:95-129.
29. Edwards M, Morse DR, Fielding AH. Expert systems: frames, rules or logic for species identification? *Comput Appl Biosci.* 1987; 3:1-7.

30. Holman JG, Cookson MJ. Expert systems for medical applications. *J Med Eng Technol.* 1987; 11:151-9.
31. Kahn MG, Bailey TC, Steib SA, Fraser VJ, Dunagan WC. Statistical process control methods for expert system performance monitoring. *J Am Med Inform Assoc.* 1996; 3:258-69.
32. Blom JA. Temporal logics and real time expert systems. *Comput Methods Programs Biomed.* 1996; 51:35-49.
33. Metaxiotis KS, Samouilidis JE. Expert systems in medicine: academic exercise or practical tool? *J Med Eng Technol.* 2000; 24:68-72.
34. Edwards M, Cooley RE. Expertise in expert systems: knowledge acquisition for biological expert systems. *Comput Appl Biosci.* 1993; 9:657-65.
35. Bellazzi R, Zupan B. Predictive data mining in clinical medicine: current issues and guidelines. *Int J Med Inform.* 2008; 77:81-97.
36. Urbach D, Moore JH. Data mining and the evolution of biological complexity. *BioData Min.* 2011; 4:7.
37. Hamelryck T. Probabilistic models and machine learning in structural bioinformatics. *Stat Methods Med Res.* 2009; 18:505-26.
38. Isci S, Ozturk C, Jones J, Otu HH. Pathway analysis of high-throughput biological data within a Bayesian network framework. *Bioinformatics.* 2011; 27:1667-74.
39. Kuschner KW, Malyarenko DI, Cooke WE, Cazares LH, Semmes OJ, Tracy ER. A Bayesian network approach to feature selection in mass spectrometry data. *BMC Bioinformatics.* 2010; 11:177.
40. Chakrabarti BK, Basu A. Neural network modeling. *Prog Brain Res.* 2008; 168:155-68.
41. Biciato S. Artificial neural network technologies to identify biomarkers for therapeutic intervention. *Curr Opin Mol Ther.* 2004; 6:616-23.
42. Lynd LD, O'Brien BJ. Advances in risk-benefit evaluation using probabilistic simulation methods: an application to the prophylaxis of deep vein thrombosis. *J Clin Epidemiol.* 2004; 57:795-803.
43. Kopec JA, Finès P, Manuel DG, Buckeridge DL, Flanagan WM, Oderkirk J, *et al.* Validation of population-based disease simulation models: a review of concepts and methods. *BMC Public Health.* 2010; 10:710.
44. Jun GT, Morris Z, Eldabi T, Harper P, Naseer A, Patel B, *et al.* Development of a Modelling and Simulation Method Comparison

- and Selection Framework for Health Services Management. *BMC Health Serv Res.* 2011; 11:108.
45. Harris SA. Modelling the biomechanical properties of DNA using computer simulation. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci.* 2006; 364:3319-34.
 46. Vitez TS, Wada R, Macario A. Fuzzy logic: theory and medical applications. *J Cardiothorac Vasc Anesth.* 1996; 10:800-8.
 47. Godil SS, Shamim MS, Enam SA, Qidwai U. Fuzzy logic: A “simple” solution for complexities in neurosciences? *Surg Neurol Int.* 2011; 2:24.
 48. Pinciroli F, Corso M, Fuggetta A, Masseroli M, Bonacina S, Marcegaglia S. Telemedicine and e-health. *IEEE Pulse.* 2011; 2:62-70.
 49. Lupiáñez-Villanueva F, Hardey M, Torrent J, Ficapal P. The integration of Information and Communication Technology into medical practice. *Int J Med Inform.* 2010; 79:478-91.
 50. Lang A, Mertes A. E-health policy and deployment activities in Europe. *Telemed J E Health.* 2011; 17:262-8.
 51. Bansard JY, Rebholz-Schuhmann D, Cameron G, Clark D, van Mulligen E, Beltrame E, *et al.* Medical informatics and bioinformatics: a bibliometric study. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2007; 11:237-43.
 52. O’Sullivan MB. Changing technologies in the reference laboratory. *Arch Pathol Lab Med.* 1987; 111:657-61.
 53. Llauroado JG. Advances in sensory devices for medicine. *Int J Biomed Comput.* 1987; 20:233-8.
 54. Myers JD. The computer as a diagnostic consultant, with emphasis on use of laboratory data. *Clin Chem.* 1986; 32:1714-8.
 55. Van Lente F, Castellani W, Chou D, Matzen RN, Galen RS. Application of the EXPERT consultation system to accelerated laboratory testing and interpretation. *Clin Chem.* 1986; 32:1719-25.
 56. Wu J, Murphy MJ. Assessing the intrinsic precision of 3D/3D rigid image registration results for patient setup in the absence of a ground truth. *Med Phys.* 2010; 37:2501-8.
 57. Bernardis E, Yu SX. Segmentation subject to stitching constraints: finding many small structures in a large image. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2010; 13:119-26.
 58. Chadha M, Young A, Geraghty C, Masino R, Harrison L. Image guidance using 3D-ultrasound (3D-US) for daily positioning of lumpectomy cavity for boost irradiation. *Radiat Oncol.* 2011; 6:45.

59. Schade CP, Brehm JG. Improving the home health acute-care hospitalization quality measure. *Health Serv Res.* 2010; 45:712-27.
60. Mar J, Arrospide A, Begiristain JM, Larrañaga I, Elosegui E, Oliva-Moreno J. The impact of acquired brain damage in terms of epidemiology, economics and loss in quality of life. *BMC Neurol.* 2011; 11:46.
61. Duch W. Computational models of dementia and neurological problems. *Methods Mol Biol.* 2007; 401:305-36.
62. Latteri A, Arena P, Mazzone P. Characterizing Deep Brain Stimulation effects in computationally efficient neural network models. *Nonlinear Biomed Phys.* 2011; 5:2.
63. Atlamazoglou V, Thireou T, Hamodrakas Y, Spyrou G. MetaBasis: a web-based database containing metadata on software tools and databases in the field of bioinformatics. *Appl Bioinformatics.* 2006; 5:187-92.
64. Khandheria P, Garner HR. Developing a modern web interface for database-driven bioinformatics tools. *IEEE Eng Med Biol Mag.* 2007; 26:96-8.
65. Seno S, Teramoto R, Takenaka Y, Matsuda H. A method for clustering gene expression data based on graph structure. *Genome Inform.* 2004; 15:151-60.

Anexos

Estrategias de búsqueda por macroáreas

- 1 (artificial and intelligence).m_titl.¹
- 2 "neural network*":m_titl.
- 3 "genetic algorithm*":m_titl.
- 4 "expert system*":m_titl.
- 5 fuzzy logic.m_titl.
- 6 "bayesian network*":m_titl.
- 7 (simulation method* or computer simulation).m_titl.
- 8 *Artificial Intelligence/
- 9 *"Neural Networks (Computer)"/
- 10 *Expert Systems/
- 11 *Fuzzy Logic/
- 12 *Computer Simulation/
- 13 6 or 4 or 1 or 3 or 7 or 2 or 5
- 14 8 or 11 or 10 or 9 or 12
- 15 13 or 14
- 16 limit 15 to humans
- 17 limit 16 to (editorial or letter)
- 18 16 not 17
- 19 (ad or ae or dh or di or dt or du or in or mo or nu or og or pc or
ra or re or rh or rt or su or th or tu).fs.
- 20 19 and 18

Estrategias de búsqueda por especialidades

- 21 exp Neoplasms/
- 22 21 and 20
- 23 exp Skin Diseases/
- 24 23 and 20
- 25 exp Otorhinolaryngologic Diseases/
- 26 25 and 20
- 27 exp Eye Diseases/
- 28 27 and 20

1. Medline interfz OvidSP.

29 exp Respiratory Tract Diseases/
30 29 and 20
31 exp Cardiovascular Diseases/
32 31 and 20
33 exp Nervous System Diseases/
34 33 and 20
35 “bacterial infections and mycoses”/ or virus diseases/ or parasitic
diseases/
36 35 and 20
37 exp Musculoskeletal Diseases/
38 37 and 20
39 exp Digestive System Diseases/
40 20 and 39
41 exp Male Urogenital Diseases/
42 20 and 41
43 exp “female urogenital diseases and pregnancy complications”/
44 20 and 43
45 exp “hemic and lymphatic diseases”/ or disease/
46 45 and 20
47 exp “congenital, hereditary, and neonatal diseases and abnorma-
lities”/
48 20 and 47
49 exp “nutritional and metabolic diseases”/ or exp endocrine sys-
tem diseases/
50 20 and 49
51 exp Immune System Diseases/
52 20 and 51

I.S.B.N.: 978-84-96990-87-6



9 788496 990876

Precio: 10 €