

**ARTÍCULO DE REVISIÓN**

Online ISSN: 2665-0193

Print ISSN: 1315-2823

Áreas y algoritmos de inteligencia artificial aplicados en Odontología**Areas and algorithms of artificial intelligence applied in dentistry**Romero Méndez Ybelisse ¹, Ramírez Soto Yucelin C. ², Rojas Hernández, Ramphy S. ³

¹Doctora en Ciencias Sociales, Mención Salud. Docente de la Facultad de Odontología. Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. ²Médico Cirujano, Docente de la Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela. ³Licenciado. Teología. Docente Dirección de Tecnología Avanzada, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela.

yberomero@gmail.com

Recibido 01/10/2024

Aceptado 03/12/2024

Resumen

La inteligencia artificial (IA) hoy día está en todos los ámbitos de acción, sumándose de manera sinérgica a los procesos digitales. En odontología, la IA ha irrumpido de manera abrupta cambiando radicalmente los protocolos de atención a procesos digitalizados, creando sistemas que simulan la actividad humana. Fue una revisión literaria donde se analizaron usos y beneficios de las áreas y algoritmos de IA en odontología. Se observó que la IA ha impactado positivamente en los diagnósticos imagenológicos aplicados en las distintas disciplinas odontológicas, el área más utilizada es el aprendizaje profundo (Deep learning) y el algoritmo más reportado es el de las redes convolucionales (CNN), lo que ha permitido diagnósticos más certeros, mayor precisión y mejores planes de tratamientos. Su auge en el campo odontológico, se debe porque potencia las habilidades del profesional, optimizando la atención dental, con mejores rendimientos superando en ocasiones los errores humanos. Se concluye que, a pesar de los grandes avances de la IA en odontología, actualmente no puede sustituir por completo el papel del conocimiento y la experiencia del profesional. Cualquier decisión apoyada en la información proporcionada por un sistema basado en el procesamiento automatizado de algoritmos deberá ser supervisada por un ser humano cualificado.

Palabras clave: odontología, inteligencia artificial, algoritmos.

Summary

Oral artificial intelligence (AI) is now present in all areas of action, synergistically adding to digital processes. In dentistry, AI has burst in abruptly, radically changing care protocols to digitalized processes, creating systems that simulate human activity. It was a literature review where the uses and benefits of AI areas and algorithms in dentistry were analyzed. It was observed that AI has positively impacted imaging diagnoses applied in different dental disciplines, the most used area is deep learning and the most reported algorithm is convolutional networks (CNN), which has allowed more accurate diagnoses, greater precision and better treatment plans. Its rise in the dental field is due to the fact that it enhances the skills of the professional, optimizing dental care, with better performances sometimes overcoming human errors. It is concluded: despite the great advances of AI in dentistry, it cannot currently completely replace the role of the professional's knowledge and experience. Any decision based on information provided by a system based on automated algorithmic processing must be supervised by a qualified human being.

Keywords: dentistry, artificial intelligence, algorithms.

Introducción

Hoy día, se comprende que la inteligencia artificial (IA) está en todos los ámbitos de acción, sumándose de manera sinérgica a los procesos digitales. La IA ha sido objeto de numerosas discusiones y debates en los últimos años, si bien es cierto que la tecnología cambia año tras año, con la IA se puede observar que los cambios se ven día tras día, impactando de manera directa o indirecta en el ser humano. Su futuro es prometedor, en el sentido que revoluciona radicalmente en los diversos aspectos de la cotidianidad, creando nuevas formas de interactuar con el mundo que la rodea. Esto va desde la automatización de los procesos hasta la personalización de los servicios.

La brecha entre lo real y lo imaginado disminuye cuando se hace uso de la IA de manera consciente o inconsciente, ya sea a través de las aplicaciones de teléfonos móviles, asistentes virtuales, televisores, relojes inteligentes, automóviles entre otros^{1,2}. El uso de estas aplicaciones ha cambiado radicalmente la forma en que se trabaja, se compra y se comunica, y ha revolucionado el sector laboral, académico, industrial, económico, político, el sector salud y los sistemas de atención, entre otros³. La odontología no escapa a esta situación, dado que la IA ha irrumpido de manera abrupta en el campo de la salud bucal cambiando radicalmente el sistema de atención a uno con nuevos equipos, instrumentos y métodos diagnósticos perfeccionados, digitalizados y de mayor precisión.^{3,4}

Esta transformación de la odontología se da por el uso de las diferentes áreas de IA y sus algoritmos, que crean sistemas que simulan la actividad humana y que responden a la búsqueda de la información digital^{1,2}. Cuando se incursiona en el mundo digital y se establece la interacción, los algoritmos reconocen palabras claves y a los segundos, simplemente se obtiene una información que se escribe, se ve o se habla.^{3,4}

El primero que definió a la IA fue John McCarthy⁵ en 1955, como la ciencia e ingeniería de hacer máquinas inteligentes, especialmente programas de cómputo inteligentes. Se relaciona con la capacidad de entender, razonar, aprender, planificar, percibir, procesar lenguaje natural y operar objetos físicos. Mientras que Oxford English Dictionary⁶, la considera como la teoría y el desarrollo de sistemas informáticos capaces de realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, como la percepción visual, el reconocimiento del habla, la toma de decisiones y la traducción automática. Se puede considerar como un campo de estudio que busca explicar y emular el comportamiento inteligente en términos de procesos computacionales, cuyo objeto es que los sistemas informáticos desarrollen procesos lógicos semejantes a la mente humana⁷. La UNESCO la refiere como máquinas capaces de imitar ciertas funcionalidades de la inteligencia humana, incluidas características tales como percepción, aprendizaje, razonamiento, resolución de problemas, interacción con el lenguaje e incluso producción de trabajos creativos.⁸

Funcionamiento de la IA en el campo de la salud

La investigación de la IA en el ámbito sanitario está aportando avances decisivos en el diagnóstico, terapéutica, genética, materiales, dispositivos y tecnología; y la odontología ha estado a la vanguardia de muchas de estas innovaciones. La clave de la máquina está representada por los algoritmos alimentados por los datos y el sistema. Estos algoritmos entrenan a la máquina y le dan instrucciones. Una vez que aprende, puede incluso hacer variaciones, reconocimientos, deducciones, inferencias y “pensar” en una posible solución alternativa.

El modelo de aprendizaje automático permite predecir resultados a través de la búsqueda de datos y descubrir conocimientos, autoaprender y

lograr soluciones a través del uso de los algoritmos. No obstante, el desarrollo de este aprendizaje no sólo se debe al nacimiento del algoritmo IA, sino también, al complemento que se forma con la gran base de datos (*Big Data*) y el crecimiento informático, constituyendo tres elementos esenciales:^{9,10}

Algoritmos de IA

Representan un conjunto de reglas y procesos diseñados para que la máquina aprende y tome decisiones por sí misma a través del procesamiento y análisis de datos, sin la intervención humana. Ellos son esenciales y se refieren a la fuerza impulsora que otorga funcionalidad a la máquina. Se comportan como "sistemas expertos", donde el conocimiento sobre un determinado tema, representa la codificación de un conjunto de reglas que se aplican para obtener resultados predecibles y confiables, logrados a través de combinaciones¹¹. Los modelos algorítmicos establecen asociaciones con los grandes volúmenes de datos relacionados sobre un problema de interés, a través de su activación se generan procesos complejos de correlaciones, tendencias, inferencia y transformaciones, esto permite extraer un valor significativo de esos datos, que son concebidos como materia prima. Los nuevos datos crean patrones, cuando el algoritmo analiza un caso nuevo al que no había sido expuesto previamente.¹² En sí, son una serie de pasos o instrucciones para completar una tarea, que requiere de una *Input* o entrada de cualquier información, textual, auditiva o visual, que será procesada para producir o generar un *output* o resultado deseado.^{12,13}

Macrodatos o *Big Data*

Se refieren a conjuntos de datos extremadamente grandes y complejos que se encuentran en el sistema y que se alimentan cada segundo con información nueva digitalizada. En el campo odontológico la *Big Data* representa toda la

información digitalizada relacionada con la cotidianidad odontológica, como informes clínicos, imágenes, fotografías, exámenes de laboratorios y clínicos, registros electrónicos de diagnósticos salud y tratamientos, ensayos clínicos, textos y revistas digitalizadas, datos de voz y escritos, entre otros.^{13,14} En su sentido más amplio, la *Big Data* odontológica está dada por datos en línea, utilizados y aplicados, en cualquier área disciplinar como radiología, endodoncia, ortodoncia, cirugía bucal y maxilofacial, implantología, prostodoncia, periodoncia, patología oral, cariólogía, y odontología forense.

Estos conjuntos de datos de acuerdo con la aplicación, pueden oscilar en variedad y volumen, lo que hace que a mayor volumen, más y mejor calidad de respuestas. La calidad representa un aspecto crucial para que se generen respuestas de acuerdo a las necesidades y al contexto, abarca criterios de precisión, coherencia, integridad, credibilidad y actualidad del dato¹⁴. La presencia de una óptima *Big Data* en el ámbito odontológico, permite a los algoritmos recopilar y analizar mayor y mejor información, útil para la toma de decisiones y predicción de resultados que benefician la atención y los servicios clínicos, mejoran la experiencia del paciente, optimizan procedimientos y técnicas, detectan errores, realizan análisis predictivos, entre otras aplicaciones, con una memoria casi infinita.^{9,14-16}

Desarrollo tecnológico-computacional

Conformado por los *hardware*, *software*, sistema de redes e internet; es el andamiaje tecnológico que permite el procesamiento de la inmensa cantidad de datos, con mecanismos computacionales. El crecimiento informático y los sistemas de interconectividad hace que los macros datos sean objeto de un tratamiento automatizado, una vez que sean introducidos al sistema, para generar la respuesta u "*output*".^{13,14,17} Gracias al crecimiento del poder computacional, los avances en diversos métodos y técnicas, junto a la llamada "explosión de

datos”, hacen que la IA se posicione como una tecnología de soporte en diferentes dominios, desde la industria mercantil, educación hasta la salud.⁸ Sin lugar a duda, la adopción de tecnologías digitales en el ámbito médico, se ha convertido en una necesidad, creando organizaciones digitales del campo de la salud bucal, lo que facilita la eficiencia operativa, éxitos a larga data y garantiza la ventaja competitiva en el mercado laboral.^{19,20}

Uso de la IA en odontología

La tecnología en odontología, ha generado un nuevo campo digital desde hace varias décadas, transformado los procedimientos analógicos en procesos digitales, evolucionando el quehacer odontológico^{4,9,14}. A esto se le suma la IA, en la década de 1980, con grandes avances^{22,24} y cambios en los protocolos de actuación al integrar procesos y procedimientos en los diagnósticos y tratamientos, registros electrónicos de historias clínicas, datos socio-demográficos, resultados imagenológicos, de laboratorios, microscópicos y macroscópicos, entre otros, captando su interacción y asociación, extrayendo solo aquella información relevante para el odontólogo y necesaria para el paciente¹⁶. La capacidad de generalizar, validar la utilidad e interpretar, son las piedras angulares de la IA en el ámbito de la salud bucal.^{21,22}

Su objetivo está dirigido a crear sistemas informáticos que desarrollen procesos lógicos semejantes a la mente humana. Es un campo de estudio que busca explicar y emular el comportamiento inteligente del odontólogo, en términos de procesos computacionales¹. Entre las aplicaciones de IA en el campo odontológico se tiene:

- Diagnóstico asistido y apoyo en la toma de decisiones: sistemas capaces de mejorar significativamente la precisión de los diagnósticos y acelerar el proceso de detección de enfermedades o elección del tratamiento

más adecuado; esto incluye análisis de datos clínicos, historiales médicos, resultados de pruebas de laboratorio, biopsias, radiografías, tomografías, resonancias y la exploración clínica. Tiene la capacidad de analizar grandes volúmenes de datos, identificar patrones, correlacionarlos y compararlos con casos previos, proporcionando información valiosa para el diagnóstico asistido.^{13,19,15}

- Planificación de tratamientos: mediante el uso de las áreas de la IA, se logran personalizar planes de tratamiento al analizar datos de pacientes, apoyando al odontólogo en la toma de decisiones informadas con resultados efectivos, respondiendo a las necesidades individuales de cada paciente.¹³
- Predicción de respuestas al tratamiento: esto se logra al analizar datos históricos de pacientes con características similares y resultados de tratamientos anteriores. Lo que permite ofrecer recomendaciones personalizadas sobre los tratamientos más efectivos en un caso específico, logrando una atención precisa que optimiza los resultados del tratamiento.^{15,25}
- Análisis de imágenes médicas: sistemas capaces de analizar de manera rápida y precisa radiografías periapicales, panorámicas, aletas de mordida, tomografías computarizadas (TCBC) y resonancias magnéticas (MRI), para identificar patologías y características imperceptibles a la vista humana.^{16,26,27}. A través de estos análisis se logra diagnósticos precisos y tratamientos eficaces.
- Identificación de biomarcadores: sistemas capaces de detectar indicadores biológicos que pueden revelar la presencia de una enfermedad al analizar grandes conjuntos de datos genéticos, hematológicos y moleculares; e identificar patrones específicos en los genes, células y moléculas asociados con patologías bucales.²⁸
- Realidad virtual y realidad aumentada: la realidad virtual es una tecnología inmersiva en los entornos virtuales, se expresa como una experiencia de presencia en el mundo real. La

realidad aumentada se define como un desarrollo interactivo de la tecnología que utiliza información animada adicional en el mundo real del usuario, mejora eficazmente la vida real del usuario a través de la simulación virtual de imágenes y vídeos en directo, ya que superpone información digital en el entorno dental del mundo real 3D, ayudando a los profesionales en los procedimientos y mejorando la precisión^{13,25}. Es importante diferenciar ambos conceptos con sus funciones, inmersión significa la sensación de presencia en el entorno virtual, e interacción, es la capacidad de modificación del campo real utilizado en la visualización de tratamientos, cirugías dentales, simulaciones y como sistema educativo para el paciente.^{19,29-31}

- Telepresencia, o teleodontología: se refiere al uso de tecnologías de telecomunicación para proporcionar atención odontológica a distancia, lo que incluye consulta, diagnóstico, tratamiento, seguimiento educación y prevención, sin la necesidad de la presencia física. Además, permite el intercambio de información al compartir imágenes y datos entre especialistas para obtener opiniones y planificar tratamientos en conjunto.^{32,33}
- Robótica y automatización de procesos: utilizada para automatizar tareas repetitivas en odontología, como la preparación de los dientes, la colocación de implantes, ajustes de ortodoncia, o las cirugías asistidas por robot, empleada en esto últimos años.^{13,22,25}
- Reconocimiento del lenguaje natural (NPL): sistemas capaces de reconocer, reproducir de modo artificial y descifrar el significado de un mandato a través del lenguaje hablado. Incluye también la traducción automática entre diferentes idiomas, así como respuestas automáticas de preguntas, análisis y síntesis de documentos, conversión de texto a voz y de voz a texto.¹⁵
- Asistentes virtuales: uso de chat para el apoyo de la logística de los consultorios odontológicos, establecen estrategias de

planeación de tratamientos, apoyan la dosificación de medicamentos, sistematización de datos y ayudan a los pacientes a programar citas, responden preguntas frecuentes y proporcionan información sobre cuidados dentales, todo esto con el fin de agilizar la función del odontólogo y mejorar la experiencia del paciente^{13,15,22,23,34}

- Apoyo a la investigación biomédica: sistemas que permiten aplicar herramientas de aprendizaje automático, profundo y generativo de la IA, en las distintas situaciones que se presentan en el consultorio odontológico. Este tipo de aproximación ofrece numerosas hipótesis para resolver interrogantes presentes.¹¹
- Reconocimiento visual: sistemas capaces de reconocer y rastrear objetos y personas en imágenes y video¹⁵ y son capaces de navegar a través de los espacios clínicos.²⁵

Áreas y algoritmos de la IA empleados en odontología

La IA en la actualidad presenta tres modelos: *Machine Learning* (ML) o Aprendizaje Automático, *Deep Learning* (DL) o Aprendizaje Profundo y *Generative Artificial Intelligence* (GAI) o inteligencia artificial generativa. Estos son tres conceptos claves en la automatización de los procesos médicos odontológicos que no deben ser utilizados como sinónimos, ya que cada uno tiene procesos, niveles de complejidad y algoritmos distintos. El DL y la GAI, forman parte del ML.^{9,15}

Machine Learning (ML) o Aprendizaje Automático

Es un modelo simple de IA que está formado por tres capas, entrada de la información (*input*), proceso y salida o resultado (*output*). Se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos que permiten hacer predicciones, inferencias, distribuciones y clasificaciones. El aprendizaje automático incluye aprendizaje supervisado, no

supervisado y por refuerzo^{35,36}. Su material de insumo en el área odontológica está representado por exámenes de laboratorios, registros electrónicos, datos personales, registros de exploración clínica, índices dentales, manuscritos científicos, entre otros, lo que le permite realizar tareas específicas sin ser programadas explícitamente. Esta rama de la IA ha servido de fundamento para el desarrollo de la inteligencia artificial. Los algoritmos de ML más utilizados en odontología son:^{13,16,37}

Regresión lineal

Técnica de análisis de datos que predice el valor de datos desconocidos mediante el uso de otro valor de datos relacionado y conocido⁹. Ha sido utilizado en odontopediatría en pacientes con dentición mixta, para predecir el tamaño de caninos y premolares no erupcionados con una alta precisión³⁸. En operatoria, sirve para determinar el tipo de material restaurador adecuado para cada paciente, prediciendo la longevidad de las restauraciones compuestas y las amalgamas, con un error mínimo promedio³⁹. Además, que permite predecir el cambio de color de los dientes después del blanqueamiento dental. En patología ha sido utilizado para la determinación del pronóstico del cáncer bucal, con una precisión de 93,81%.^{16,39,40}

Soport Vector Machine (SVM) o máquinas de soporte vectorial

Es un algoritmo de aprendizaje supervisado que simula una relación matemática entre variables y realiza predicciones para variables continuas o numéricas. Ha sido empleado en el diagnóstico y predicción de la enfermedad periodontal con una precisión de 98% y una velocidad menor que otros algoritmos, tomando como información de entrada datos personales del paciente y los valores de los índices periodontales; también permite la categorización de las bacterias subgingivales.^{9,41} Su uso ha sido reportado para establecer la clasificación de los patrones esqueléticos I, II y III, utilizando variables craneomaxilares y

cefalogramas laterales como información de entrada; la predicción del modelo fue de 62,50%, 77,78% y 82,35%, para cada patrón.⁴² Un modelo de SVM en patología, clasificó lesiones bucales malignas o displásicas; y detectó zonas de periimplantitis². En cariológia ha permitido la evaluación de la condición intrabucal; mientras que en prótesis el modelo es utilizado para la clasificación de las arcadas dentales y predicción de la apariencia facial en pacientes edéntulos.^{9,43}

Árbol de decisión

Es una herramienta analítica y visual utilizada para tomar decisiones informadas, se ilustra en forma de árbol, donde cada nodo representa una decisión o evento y las ramas representan el resultado de una prueba. Ha sido utilizado en la predicción del éxito de los implantes dentales con una precisión, sensibilidad y especificidad del 89,31%, 67,17% y 95,92%, respectivamente, utilizando como información de entrada registros electrónicos y diagnósticos.⁴⁴

Deep Learning (DL) o Aprendizaje Profundo

Es una IA más compleja que nace a partir del ML, de donde provienen sus algoritmos de aprendizaje profundo. Presenta una estructura de redes neuronales artificiales con múltiples capas de procesamiento para aprender representaciones de datos de forma automática. El diseño de las redes neuronales artificiales está inspirado en la estructura del cerebro humano, conformada por un gran número de células que siguen un orden jerárquico^{2,16}. En sí, es un sistema que simula la sinapsis del cerebro a través de las “neuronas artificiales”, donde cada conexión entre neuronas transmite señales, cuya intensidad puede amplificarse o atenuarse continuamente durante el proceso de aprendizaje, emulando el proceso neuronal del cerebro humano. Las neuronas se organizan en redes con diferentes capas, una primera capa de recepción o “input”, que recibe la información, muchas capas ocultas interconectando nodos y una última capa o el “output” que produce

la respuesta^{16,36,45}. Las redes neuronales profundas son capaces de aprender y extraer características complejas y abstractas de un conjunto de datos grandes y no estructurados, estos pueden ser imágenes, texto o sonido y emitir una respuesta para la resolución de problemas, además que aprenden a producir resultados pertinentes^{13,20}. Entre los algoritmos de DL están redes neuronales naturales artificiales (ANN), redes neuronales recurrentes (RNN) y redes neuronales convolucionales (CNN). Las RNN aun cuando fueron creadas para manejar secuencias de datos, como como traducción automática, generación de texto, análisis de sentimientos o tareas de procesamiento de lenguaje natural, su uso en odontología ha sido poco reportado^{9,13,16,37,46}. Los más utilizados en odontología son las ANN y las CNN.

Artificial Neuronal Net (ANN) o Redes Neuronales Artificiales (RNA)

Es un modelo básico de aprendizaje profundo que consta de 3 capas de neuronas: entrada, capas ocultas y salida; las entradas son procesadas solo en la dirección de avance. Las capas ocultas tienen la propiedad de pesar cada dato recibido de las capas anteriores y realizar ajustes antes de enviar los datos, a la siguiente capa. Cada capa oculta actúa como una capa de entrada y salida, lo que permite a la aplicación comprender entidades más complejas.^{9,16,47}

Su uso en odontología ha sido amplio entre estos tenemos: en patología se ha empleado para distinguir las lesiones orales malignas y displásicas². Dar-Odeh *et al.*⁴⁸ expresan que sirven para predecir la presencia o ausencia de ulceración aftosa recurrente, tomando como datos de entrada factores predisponentes como género, datos hematológicos y micológicos, higiene y dieta, con una precisión de 90%.

Este modelo ha tenido gran potencial en la toma de decisiones clínicas para tratamientos predecibles en ortodoncia, influyendo en su

planificación y predicción de la necesidad de extracción dental antes del tratamiento, utilizando como datos de entrada los registros de ortodoncia, rasgos morfológicos dentofaciales y mediciones cefalométricas. La tasa de éxito ha sido de 93% para el diagnóstico de extracción, frente a 84% para la no extracción^{48,49}. Usado también para analizar las discrepancias esqueléticas y dentales para un diagnóstico cefalométrico consistente, utilizando variables cefalométricas e índices como datos de entrada.⁵⁰ En esta disciplina el modelo no solo mostró coincidencia con los ortodontistas, también reveló contradicciones anatómicas o fisiológicas que no fueron percibidas por los profesionales.^{51,52}

En endodoncia ha sido utilizado para la ubicación del foramen apical y determinar la longitud de trabajo y longitud de la raíz; un modelo ANN sirvió como segunda opinión para los endodoncistas, mostrando una precisión de 93% en la ubicación del foramen apical y 96% en la longitud de la raíz, al analizar las imágenes radiográficas. La IA tuvo más aciertos (76%) que los endodoncistas (76%).^{13,36,52}

Los estudios de Moayeri *et al.*,⁴⁴ utilizando la arquitectura ANN en implantología, con una alta predicción de éxito en los implantes dentales (90,22%). En periodoncia, su valor de precisión es de 90% a 98% en el diagnóstico de la periodontitis agresiva o periodontitis crónica, introduciendo datos clínicos y patológicos como el recuento hematológico e inmunológico según los trabajos de Papantonopoulos *et al.*⁵³. En prótesis, Li Hy *et al.*,⁵⁴ lograron alta precisión en la coincidencia de colores entre coronas y dientes naturales.

En cirugía el modelo demostró eficacia al detectar fracturas radicales verticales con sensibilidad (98%), especificidad (90,5%) y precisión (95,7%), los datos de entrenamiento fueron la escala de grises por línea que pasan a través de la raíz⁵⁵. Igualmente se aplicaron para la identificación de lesiones quísticas⁵⁶. En la

odontología forense ha sido utilizada para determinar el sexo y la raza en cadáveres, con mínimos errores². Este modelo también reconoce los hábitos alimenticios adecuados, la higiene bucal y la prevención del estrés como los factores más importantes para prevenir el dolor dentario⁵⁶

Convuncional Neuronal Net (CNN) o Red Neuronal Convolutacional (RNC)

Es un algoritmo diseñado específicamente para procesar datos con estructura espacial de forma no lineal, como imágenes y videos. También creado para el reconocimiento del habla humana. Su estructura es de multicapas de convolución, además presenta la capa de agrupación y la capa totalmente conectada a las capas ocultas. Las capas de convolución se utilizan para generar mapas de entidades de datos de entrada y capas conectadas a todas las neuronas activadas en la capa anterior, lo que transforma los mapas de características 2D en 1D. La eficiencia y precisión en el reconocimiento de imágenes, está dado por el uso de las capas ocultas funcionales.^{9,13}

La arquitectura CNN ha sido la más reportada en odontología por el diagnóstico imagenológico, la visión computacional, la realidad aumentada, el reconocimiento de patrones. En imagenología ha logrado avances significativos en precisión y eficiencia de los diagnósticos, reduciendo la complejidad de las imágenes. Esto se considera la puerta de entrada de la IA en el área de la salud, ya que los diagnósticos y la codificación de las imágenes digitales, se traducen más fácil en el lenguaje informático^{2,57,58}. El algoritmo ha demostrado una intensa capacidad para detectar e identificar estructuras fisiológicas, anatómicas, dentarias, patologías, lesiones apicales, pérdida de hueso, caries, lesiones tumorales, fracturas radiculares y osteoporosis. Igualmente puede diagnosticar materiales odontológicos y artefactos extraños²⁵. Su alto rendimiento odontológico, se destaca por la precisión en el diagnóstico y planificación del tratamiento^{24,59}. La tasa de precisión en el diagnóstico de

estructuras anatómicas y dentarias es de 95,8 a 99,45 %, respectivamente, casi rivalizando con los expertos clínicos, cuya tasa de precisión esta alrededor de 99,98 %.¹³

Carrillo-Perez *et al.*⁵⁷ aplicando un modelo CNN para el análisis de 1200 tomografías computarizadas de haz cónico (CBCT) de dientes segmentados, crearon resultados que sirven como referencia clínica rápida, precisa y eficaz de las segmentaciones. Los autores descubrieron que la IA se desempeña tan bien como un operador humano, de manera más rápida y jerárquica alcanzando una precisión del 99,1%.

En el área de la cirugía oral y maxilofacial la mayoría de los estudios realizados con estas redes han permitido detectar tumores, utilizando como datos de entrada imágenes radiográficas, tomográficas, microscópicas y ultrasonografías, además de registros médicos^{58,59}. Estudios sobre el análisis de la radiolucidez periapical y la reabsorción ósea alveolar en radiografías panorámicas reportan una precisión de 92,8%, similar a 24 cirujanos orales y maxilofaciales^{60,61}. Igualmente ha sido una herramienta útil para identificar fracturas radiculares verticales en dientes intactos con o sin endodoncia, con radiografías panorámicas, periapicales y CBCT; observándose un mejor resultado al analizar las CBCT por la mayor especificidad, precisión y sensibilidad^{58,62,63}. El trabajo realizado por Kishimoto,⁶⁴ refiere que el nivel de precisión de los numerosos análisis en este campo ha sido de 83,0% a 98,9%.

En el área periodontal ha sido propuesto este modelo de forma aislada o híbrida para el diagnóstico de la enfermedad periodontal, predicción de la extracción de dientes periodontalmente comprometidos, análisis de la pérdida ósea periodontal y nivel de periodontitis, en radiografías panorámicas. La precisión diagnóstica para dientes con compromiso periodontal fue 81,0% para premolares y 76,7% para molares; y la precisión en la predicción de la

extracción de dientes severamente comprometidos fue 82,8% para premolares y 73,4% para molares^{59,63,65,66}. Basándose en el nivel de pérdida ósea alveolar, un modelo CNN ha sido utilizado para identificar molares y premolares con problemas periodontales y predecir la esperanza de vida.⁶⁶ Igual Ding⁹ refiere que con otros datos de entradas diferentes al imagenológicos, como datos sistémicos, se logra diagnosticar también, la condición periodontal.

Otra invención más comentada de los últimos tiempos es la atención de ortodoncia personalizada impulsada por IA, utilizada para el diagnóstico esquelético a través del análisis cefalométrico⁶⁷. También se puede medir el impacto del tratamiento con el uso de fotografías, y evaluar el atractivo facial y apariencia etaria postratamiento. Usada además para predecir la localización y angulación de los terceros molares a través de radiografías y CBCT. La mayoría de los estudios en este campo han evaluado el desempeño de las CNN, con una tasa de éxito entre el 80,0% y a 97%.^{67, 68}

De la misma manera, se ha utilizado CNN en endodoncia para diagnosticar y planear los tratamientos en menor tiempo, con una precisión de 90%;^{15,61} para identificar lesiones periapicales y hacer diagnóstico diferencial de las raíces distales de primeros molares inferiores, utilizando radiografías panorámicas y tomografías;^{13,60,69} y para determinar el número de conductos de la raíz distal de molares inferiores con CBCT, con un nivel de acierto de 142, sobre 153 imágenes. Este algoritmo permite igualmente detectar zonas radiolucidas apicales y predecir la presencia de conductos en forma de C en segundos molares inferiores, utilizando radiografías periapicales, con una alta precisión.^{16,60}

De igual manera permite realizar predicciones de retratamiento no quirúrgico del conducto radicular con riesgos y beneficios, el modelo aconseja la necesidad del retratamiento^{13,15}. El estudio de Ngoc *et al.*⁷⁰ reportó la combinación de

un R-CNN y el conocimiento de expertos para clasificar dientes con y sin obturación de conductos, utilizando 1000 radiografías periapicales, logrando una precisión general de 95,6 %.

Dentro de la patología oral, se ha reportado el uso de un DCNN para el diagnóstico de lesiones quísticas odontológicas, a través del análisis panorámico y tomográfico. También se han detectado y diferenciado ameloblastomas y tumores queratoquísticos en radiografías panorámicas, logrando una especificidad y precisión de 83,3% y 83%, respectivamente⁷¹. En otro intento, Issa *et al.*⁷² utilizaron este modelo para identificar lesiones apicales y reconocer dientes sanos en radiografías periapicales con una especificidad del 97,87% y además diferenciaron granulomas de los quistes periapicales utilizando imágenes CBCT.

En relación al diagnóstico de caries, se ha propuesto un algoritmo CNN para su detección temprana en imágenes intraorales y radiografías periapicales, generando una buena relación costo-efectividad.⁶⁶ Otros estudios revelan el diagnóstico de la caries proximal, con mayor precisión, superando al de los odontólogos, por ser más eficaces y menos costosos, en un análisis de 800 radiografías de aletas de mordida, donde se identificaron caries y restauraciones con una alta precisión, 95,56% y 90,30% respectivamente. Varios autores afirman que, al agregar datos periodontales como información de entrada, se logran detectar signos de juicio y mejores resultados en el diagnóstico de caries dental.^{66,73,74}

El área de la prótesis ha tenido grandes avances el uso de la IA, al crear modelos de CNN que generan coronas y restauraciones dentales de forma autónoma cumpliendo con los más altos estándares de ajuste, función y estética, con una precisión media que oscila entre el 90,6% y 97,4%. Igualmente, Revilla *et al.*⁷⁵ proponen un método para predecir el cambio en la apariencia facial después de la colocación de una prótesis

total removible, utilizando datos de escaneo facial.

En implantología al analizar radiografías panorámicas y periapicales con modelos de DCNN, se identificaron los tipos de implantes con una precisión de 93,8%⁴ y se detectó a que clasificación pertenecían, fracturas y zonas con periimplantitis. En estos estudios no se encontró diferencia significativa de la precisión entre el modelo y los periodoncistas, no siendo igual para los implantólogos². En estética ha sido usada en el diseño de la sonrisa y para predecir los vértices de los dientes uno por uno en su totalidad en 3D, utilizando como datos de entrada fotografías, escaneos intraorales y tomografías computarizadas para la planificación del tratamiento con un RCNN.⁵⁹ En odontología forense se ha utilizado para determinar la edad del cadáver mostrando una precisión de 73% en radiografías panorámicas.

Además, se ha empleado para analizar marcas de mordeduras y predecir la morfología mandibular con una precisión de 79,2%–95,8%.⁷⁶ Miki *et al.*⁷⁷ desarrollaron un modelo CNN para el llenado automatizado de historias clínicas dentales con fines de identificación forense, no obstante, también valioso para el sistema digital de planificación del tratamiento en implantología y prótesis.

Generative Artificial Intelligence (GAI) o IA Generativa

Representa un área de la IA que ha impactado significativo en la odontología, sus algoritmos no solo analizan datos, sino también, pueden generar nuevos datos y modelos, lo que abre nuevas posibilidades en el diagnóstico, planificación y tratamiento dental. Utilizan técnicas de aprendizaje profundo, como las redes neuronales generativas adversariales (GANs) y los transformer, para aprender patrones y características de los datos y generar nuevas muestras que imitan el estilo y la estructura de los

datos originales, logrando crear imágenes hologramáticas o visión artificial, a partir de imágenes 2D^{9,78}. Son modelos capaces de generar contenido nuevo y original, como imágenes, música, texto, sonidos y videos, a partir de un conjunto de datos de entrada; no obstante, por su reciente aparición son pocos los estudios reportados en odontología.^{79,80} Los algoritmos de la GAI más reportados en odontología son:

Redes Generativas Antagónicas (GAN)

Es un algoritmo de aprendizaje profundo no supervisado, diseñado para descubrir automáticamente patrones a partir de datos de entrada y generar nuevos datos con patrones similares a la entrada. Está compuesto por dos redes neuronales antagónicas que compiten entre sí, un discriminador y un generador; el objetivo del discriminador es clasificar correctamente las muestras como reales o falsas. Al mismo tiempo, el generador intenta engañar al clasificador, para que crea que sus muestras son reales, aprendiendo de los datos presentados⁵⁷. Se aplican principalmente a la traducción de imagen a imagen, conversión de texto a imagen, generación de fotos plausibles de objetos, escenas y personas y creación de videos.

Este modelo ha ido avanzando con la presencia de redes volumétricas de GAN a GAN 2D y 3D, este último con una amplia gama de aplicaciones que tienen la capacidad de generar datos 3D a partir de imágenes 2D o 3D^{9,57}. Permite crear imágenes dentales sintéticas que se utilizan para entrenar otros algoritmos de IA, mejorando la precisión sin necesidad de grandes cantidades de datos reales. También permite hacer simulaciones de resultados de tratamiento para el beneficio de los pacientes.⁵⁷

Los algoritmos de IA generativa son más complejos que los de DL, y están transformando la odontología al proporcionar nuevas herramientas para el diagnóstico, la planificación y el tratamiento, mejorando la precisión y

eficiencia de los procedimientos, y ofreciendo nuevas formas de interactuar con los pacientes y personalizar los tratamientos con la realidad virtual.⁷⁹

En imagenología odontológica, las GAN son las protagonistas en la mejora de imágenes defectuosas o de baja resolución corrigiendo artefactos presentes en las TCBC dentales de baja dosis.

Con base a lo referido, este algoritmo fue utilizado para eliminar ruidos y artefactos que comprometían el diagnóstico dental en las imágenes de TCBC, obteniendo imágenes de alta calidad.^{57,80} Los resultados experimentales de Hu *et al.*,⁸⁰ confirmaron que el algoritmo propuesto, elimina eficazmente los artefactos en las imágenes de las tomografías computarizadas dentales de baja dosis, con un mejor desempeño, preservando la textura en la tomografía, en comparación con los enfoques existentes.

En ortodoncia ha habido grandes avances con el uso del modelo GAN en el diagnóstico, planificación y seguimiento de tratamientos. Agrawal *et al.*¹³ refieren que a través del análisis de radiografías e imágenes tomadas por escáneres y cámaras intraorales, el algoritmo GAN entrenado determina de forma inteligente, los puntos específicos de presión y movimientos de los dientes. También utilizado en el desarrollo de los alineadores asistidos a partir del modelo 3D, acortando los tiempos del tratamiento y simplificando las citas, esto ha proporcionado una ejecución precisa en el tratamiento y seguimiento que permite realizar ajustes manuales, de ser necesario.^{13,79}

En el proceso de rehabilitación dental y diseño de sonrisa, con esta arquitectura se pueden generar automáticamente un diseño óptimo para el paciente, utilizando fotografías digitales de su sonrisa, combinando herramientas de visualización 3D. Sumándose a las capacidades de automatización, la aplicación cuenta con

múltiples parámetros que pueden ser modificados por el usuario para lograr el resultado final deseado, reduciendo notablemente el tiempo de diseño, y alcanzando las expectativas del paciente al visualizar el diseño.^{44,79}

En prostodoncia, la versatilidad del modelo ofrece excelentes resultados para que el clínico guíe el proceso de preparación y diseño del diente y la confección de la corona, permitiendo realizar cualquier cambio necesario, con las imágenes y vídeos digitales del CAD-CAM intraoral, utilizadas como información de entrada. El modelo tiene la capacidad de mejorar el diseño del diente y de la restauración, modificar la ubicación y la geometría añadiendo o quitando parte del sustrato. La IA, pueden generar diseños de coronas basados en modelos 2D-GAN, aprendiendo de los diseños de los técnicos. También contribuye en la coincidencia de colores y en la predicción de las restauraciones diseñadas con CAD/CAM.⁵⁷

En implantología esta arquitectura permite visualización del tratamiento y modificación de los dientes, y admite el diseño de implantes 3D con una gran variedad de fabricantes y opciones incorporadas, además de la creación de los patrones para las guías quirúrgicas.⁵⁷

Conversacional Generative Pretrained Transformer (GPT) o Transformador generativo pre-entrenado conversacional

El término "*Transformer*" en IA se refiere a una red neuronal que utiliza técnicas de **aprendizaje profundo** y **autoatención** para manejar secuencias de datos, proporcionando una mejora significativa en tareas como la traducción automática, generación de texto y comprensión del lenguaje^{80,81}. La llegada de los *Transformer* con los grandes modelos de lenguaje o *large language models* (LLMs) y los grandes modelos multimodales o *large multimodal models* (LMMs), como GPT han revolucionado el campo médico por su ayuda en tareas individuales y

multitareas, superando a los expertos humanos en resúmenes, generación de referencias, razonamiento de contexto largo y recuperación de información compleja.^{82,84}

Los LLM como modelo multimodal de chat, contienen tres módulos diferentes de entrada de modelos: de visión, audio y lenguaje. La entrada de imágenes odontológicas pueden ser radiografías, TCBC, fotografías, otras imágenes médicas como muestras de tejidos. Los audios pueden ser notas clínicas, descripción de procedimientos, narraciones de las imágenes, análisis, interpretaciones, o preguntas. Ingresados los datos, este modelo visión y lenguaje evalúa las imágenes, percibe elementos críticos y captura la semántica del lenguaje, para posteriormente generar las respuestas. Su mayor competencia es la comprensión semántica del lenguaje o texto de datos con formatos estructurados como las historias y no estructurados, como notas de texto, extrayendo la rápidamente información relevante del paciente.⁸⁰

Aun cuando son pocos los casos reportados por su pronta aparición, los avances en la educación, interacción con el paciente y la investigación clínica dental, son prometedores. Tienen la propiedad de gestionar y automatizar una serie de tareas, documentaciones comunes, generación de informes sobre el historial médico, diagnósticos, toma de decisiones clínicas, discusión de planes de tratamientos, procedimientos dentales, seguimiento, análisis y resúmenes de documentos biomédicos, programación de citas y comunicación con el paciente, lo que reduce la carga administrativa^{82,82}. El reconocimiento de voz es otro elemento clave, ya que convierte los comandos de voz en texto y texto en voz; es una herramienta útil para el dictado de notas clínicas y la captación de la voz del paciente al expresar sus síntomas y signos. Una vez extraída esta información el modelo los resume y genera informes, diagnóstico y sugerencias de tratamiento. Esto hace relevante su uso en las distintas disciplinas odontológicas.⁸⁰

Su uso en imagenología es relevante, por la capacidad de codificar, procesar e interpretar imágenes y videos, de manera efectiva, rápida y convertir las imágenes en palabras, respondiendo las preguntas sobre diagnóstico, tratamientos, entre otros. El informe se logra a través de la repuesta basada en la comprensión de la imagen. Del mismo modo al proporcionar instrucciones específicas al modelo, como las características del paciente o las condiciones médicas, puede crear imágenes con propiedades o características específicas relevantes y se pueden emplear descripciones textuales para generar ilustraciones médicas o diagramas.^{59,80}

En cariología tienen un amplio uso, por la capacidad de fusionar y alinear datos textuales y visuales para el análisis de imagen-texto, lo que facilita el diagnóstico de problemas dentales mediante la interpretación de radiografías combinados con textos específicos. En endodoncia permite identificar regiones con un color más cálido y detectar probables problemas dentales al combinar técnicas de visualización específicas, infiriendo la necesidad de una terapia pulpar, sin necesidad de ajustar los datos de imágenes.⁸⁰

En patología permite realizar análisis histológicos a través de la interpretación de las imágenes patológicas y biopsias, la entrada de imagen lleva a comprender las características e identificar de enfermedades. También realiza lecturas de exámenes y comprende los resultados de análisis de sangre al proporcionar información sobre los rangos normales, además que explica las posibles implicaciones de los valores altos/bajos. De igual modo permiten rastrear el proceso de recuperación o deterioro de la enfermedad.⁵⁹

Discusión

El mayor valor de las tecnologías basadas en IA reside en los efectos sinérgicos de la interacción entre las máquinas y los seres humanos, ya que disminuye el desgaste profesional y aumenta la

seguridad del paciente. Su auge en el campo odontológico, se debe a que potencia las habilidades del profesional, optimizando la atención dental, con mejores rendimientos en los diagnósticos, toma de decisiones y planificación de los tratamientos, superando los enfoques tradicionales de vanguardia.

Razón por la que la IA se viene utilizando ampliamente en Odontología demostrando resultados prometedores en los diagnósticos imagenológicos y predicciones de tratamientos aplicados en las diferentes especialidades como la periodoncia, endodoncia, implantología, patología oral, ortodoncia, cirugía bucal y maxilofacial, cariología y odontología forense, lo que conlleva a, una mejor toma de decisión basada en la precisión con tratamientos certeros y efectivos.

El área de la IA, más ampliamente reportada en la investigación odontología está dada por los algoritmos del DL o aprendizaje profundo, lo que ha crecido exponencialmente en los últimos años por tener funcionalidades más complejas por su estructura de redes neuronales que permiten analizar imágenes, diagnosticar y planificar tratamientos. En menor proporción han sido reportados trabajos utilizando el aprendizaje automático o ML, aun cuando se utilizan para inferir pronósticos, tabular datos, clasificar, distribuir patologías o diferenciar lesiones, no obstante, a pesar de ser un modelo más sencillo, resulta ser de utilidad en la administración de los consultorios.

Finalmente se tiene que el modelo GAI, siendo la estructura más compleja y con los mayores beneficios, ha sido la menos reportada en odontología, probablemente por su más reciente aparición; pero se espera que en un tiempo cercano sea la que mejores resultados aporte.

Todos los algoritmos empleados en odontología, se caracterizan porque pueden trabajar de manera individual o combinados con otros, formando

modelos híbridos. Las investigaciones analizadas han demostrado que con el uso de la IA, se logra una precisión equivalente a la de diferentes especialistas capacitados, superando en ocasiones a los errores humanos.

Contrariamente de los beneficios y ventajas de la IA, su implementación presenta una serie de limitaciones, desafíos y retos, entre estos se tiene inicialmente el costo de la instalación del andamiaje tecnológico necesario¹⁴ y la barrera de conocimiento sobre el uso apropiado de las tecnologías en el área odontológica, lo que representa un obstáculo, aunado a la interpretabilidad de los datos.⁵

Por otro lado está en juego la privacidad de los datos, aun cuando se reconoce que proteger la data del paciente es un derecho fundamental y un reto para el profesional, al hacer diagnósticos utilizando la información clínica electrónica personal y médica de la *Big Data*, ésta queda expuesta,^{5,14} más sin embargo, para la gestión de datos personales se debe seguir el Reglamento del Parlamento Europeo y del Consejo de la Unión Europea,⁸⁴ que establece un marco jurídico uniforme, para el desarrollo, comercialización, puesta en marcha y uso de sistemas de inteligencia artificial.

Otro reto está dado por las predicciones obtenidas con la IA en el campo médico que dependen en gran medida de la precisión de las anotaciones del conjunto de datos, ya que datos etiquetados de manera incorrecta pueden generar una información confusa e inexacta en cualquiera de las disciplinas odontológicas, limitando la eficacia de los diagnósticos dentales basados en IA⁷⁸. Entre los riesgos, también se tiene el desequilibrio de datos pequeños, que no logran entrenar a los modelos o la fiabilidad de datos externos obtenidos de pacientes recién incorporados, pudiendo generar errores predictivos, tanto en los diagnósticos, pronósticos y tratamientos^{5,13,14,78}. Por tanto, se reconoce que es necesario estandarizar la investigación en el área, a fin de mejorar la calidad de la evidencia científica conociendo sus ventajas y riesgos.

Su correcto uso depende de una capacitación y entrenamiento en el área a fin de mitigar los errores, y obtener los mayores beneficios de la IA. La inteligencia artificial en odontología no está destinada, a reemplazar a los odontólogos. Por el contrario, amplía las capacidades del profesional al obtener opiniones con información adicional basadas en predicciones y decisiones matemáticas.

Conclusiones

A pesar de los grandes avances de la IA en odontología, actualmente no puede sustituir por completo el papel del conocimiento y la experiencia del profesional de la salud bucal. En este contexto la integración entre odontología y la IA debe entenderse como una herramienta complementaria que mejora la práctica clínica y que potencializa las habilidades y facultades del profesional en todas las áreas. Cualquier decisión apoyada en la información proporcionada por un sistema basado en el procesamiento automatizado de algoritmos deberá ser supervisada por un ser humano cualificado, aun cuando un modelo haya sido capaz de igualar o superar el nivel de acierto de los profesionales.

Las aplicaciones de IA en la atención odontológica tienen un papel prometedor, aun cuando existen desafíos técnicos y éticos; y a pesar de que ha llegado a numerosas especialidades odontológicas, aun no alcanzan todas las áreas de la investigación y los ámbitos académicos, dado a la necesidad de la preparación tecnológica y la rentabilidad necesarias. La rentabilidad se basa también en los cambios que ocurren a diario en la IA, ya que estos cambios tecnológicos superan los cambios en las clasificaciones y definiciones médico-odontológicas. La integración de la IA en el currículum de las escuelas odontológicas y la formación en posgrado se convierte en una necesidad, y debe formar parte de la enseñanza integral para las futuras generaciones.

Se puede esperar en un futuro cercano la ampliación de las investigaciones y la extensión de su uso, al desarrollarse máquinas capaces de comprender a los humanos y odontólogos robots en los ámbitos hospitalarios y académicos. Si bien estos últimos años ha habido grandes avances al fusionar la robótica y la IA en odontología, y la aparición subsiguiente de la cirugía robótica, con procedimientos que demuestran una precisión significativamente mejorada y acortamientos en los tiempos quirúrgicos en comparación con los procedimientos a mano alzada.

Se concluye que la actividad operatoria del odontólogo no puede ser sustituida completamente, aunque actualmente existen varios cirujanos robóticos que, con una eficiencia creciente llevan a cabo procedimientos quirúrgicos semiautomatizados bajo la supervisión de un cirujano experto⁸⁴. Además, estos modelos algorítmicos de IA fusionados con robots carecen de habilidades como la empatía, la creatividad, el juicio ético y la intuición, lo que hacen al odontólogo, insustituible en la actualidad.

La IA llega al campo odontológico para quedarse y sus usos y aplicaciones se incrementarán con los años generando beneficios en la profesión. Sumado a esto, la irrupción de la IA en el campo odontológico le permite al profesional reflexionar sobre su pensamiento crítico, al comparar sus diagnósticos y pronósticos con los emanados de la IA, garantizándole una correcta toma de decisión para cada paciente, sin abandonar su posición crítica y analítica.

Referencias

1. Rajendra P, Kumari M, Rani S, Dogra N, Boadh R, Kumar A, Dahiya M. Impact of artificial intelligence on civilization: Future perspectives, Materials Today: Proceedings.

- 2022; 1(56):252-6.
DOI: 10.1016/j.matpr.2022.01.113
2. Cacñahuaray-Martínez G, Gómez-Meza D, Lamas-Lara V, Guerrero ME. Aplicación de la inteligencia artificial en Odontología: Revisión de la literatura. *Odontol Sanmarquina*. 2021; 24(3):243-5. DOI: 10.15381/os.v24i3.20512
3. Gil-Aluja J. De la razón artificial a la inteligencia artificial Encuentros multidisciplinares. [Internet]. 2020 [citado 2024 ene 2]; 64(22):8-10. Disponible en: http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-64/Indice_n%C2%BA_64_2020.htm
4. Lanzagorta-Ortega D, Carrillo-Pérez DL, Carrillo-Esper R. Inteligencia artificial en medicina: presente y futuro. *Gac Med Mex*. 2022; 158(91):55-59. DOI: 10.24875/GMM.M22000688
5. McCarthy, J., Minsky, M. L., Rochester, N., & Shannon, C. E. A Proposal for the Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence, August 31, 1955. *AI Magazine*, 2006 27(4), 12. <https://doi.org/10.1609/aimag.v27i4.1904>
6. Oxford English Dictionary The historical English dictionary. [Internet]. 2024. (Citado 16, febrero, 2024). Disponible en: <https://www.oed.com/?tl=true>
7. Del Río S, López J, Vaquero C. La inteligencia artificial en el ámbito médico. *Rev Española Investig Quirúrgica*. 2018; 21(3):113. DOI: 10.24875/GMM.M22000688
8. UNESCO, Recomendación sobre la ética de la inteligencia artificial. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. París. 2022.
9. Ding H, Wu J, Zhao W, Matinlinna JP, Burrow MF and Tsoi JKH. Artificial intelligence in dentistry—A review. *Front. Dent. Med*. 2023; 4:1085251. DOI: 10.3389/fdmed.2023.1085251.
10. Busnatu Ș, Niculescu AG, Bolocan A, Petrescu GED, Păduraru DN, Năstăsă I, et al. Clinical Applications of Artificial Intelligence-An Updated Overview. *J Clin Med*. 2022 Apr 18; (8):2265. DOI: 10.3390/jcm11082265.
11. Obermeyer Z, Emanuel EJ. Predicting the Future - Big Data, Machine Learning, and Clinical Medicine. *N Engl J Med*. 2016 Sep 29; 375(13):1216-9. DOI:10.1056/NEJMp1606181
12. Pérez F, Jiménez J. ¿Qué es el estado del arte de la Inteligencia artificial en Odontología? *Gaceta dental: Industria y profesiones*. 2022 jun; (348):116-118.
13. Agrawal P, Nikhade P. Artificial Intelligence in Dentistry: Past, Present, and Future. *Cureus*. 2022 Jul 28; 14(7):e27405. DOI:10.7759/cureus.27405
14. López DM. Challenges of artificial intelligence and its possible solutions from a human editorialist point of view. *Biomédica*. 2023 Sep; 30;43(3):309-314. English. DOI: <https://doi.org/10.7705/biomedica.7242>
15. Ocampo M. Inteligencia Artificial. Oficina de información científica y tecnológica para el Congreso de la unión. INCyTU. México. [Internet]. 2018;(12). (Citado 25, julio, 2024) Disponible en: https://www.foroconsultivo.org.mx/INCyTU/documentos/Completa/INCYTU_18-012.pdf
16. Tandon D, Rajawat J, Banerjee M. Present and future of artificial intelligence in dentistry. *J. of Oral Biology and Craniofacial Research*. 2020; 10(4):391-396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2020.07.015>
17. Honavar V. Artificial Intelligence: An Overview. Artificial Intelligence Research Laboratory College of Information Sciences and Technology University Last revised. [Internet]. August 22, 2016. (Citado 25 julio, 2024). Disponible: <https://faculty.ist.psu.edu/vhonavar/Courses/ai/handout1.pdf>

18. Boden MA. Inteligencia Artificial. Madrid: Turner Publicaciones S.L. 2017.
19. Rudin, C. Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*. 2019; 1(5):206-215. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>
20. Lee D, & Yoon, SN. Application of Artificial Intelligence-Based Technologies in the Healthcare Industry: Opportunities and Challenges. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021; 18(1):271. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010271>
21. Bonis J, Sancho JJ, Sanz F. Sistemas informáticos de soporte a la decisión clínica. *Med Clin (Barc)*. [Internet]. 2004, Feb; 15(22):39-44. (Citado 25, julio, 2024). Disponible en: <http://www.elsevier.es/es-revista-medicina-clinica-2-articulo-sistemas-informaticos-soporte-decision-clinica-13057545>
22. Núñez J, Krois J, Schwendicke F, Sauro S. La inteligencia artificial. Qué es, su uso en odontología y qué debemos saber para aplicarla. *J, Gaceta dental*. [Internet]. 2022; (342):96-105. Disponible en: https://files.epeldano.com/publications/pdf/97/gaceta-dental_97_342.pdf
23. Nishi Singh N, Pandey A, Prakash A, Pratap B. Attitude, perception and barriers of dental professionals towards artificial intelligence. *Rev. Biología Oral e Investigación Craneofacial*. 2023; 13(5):584-588. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2023.06.006>.
24. Romeo C y Lazcoz. Inteligencia artificial aplicada a la salud: ¿qué marco jurídico? *Sistema Universitario Vasco. Proyecto PANELFIT del Programa H2020 de la Comisión Europea*. [Internet]. España 2020. (Citado 25, julio, 2024). Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7658854>
25. Adams SJ, Henderson RDE, Yi X, Babyn P. Artificial Intelligence Solutions for Analysis of X-ray Images. *Canadian Association of Radiog.* J. 2021;72(1):60-72. DOI:10.1177/0846537120941671
26. Mintz Y, Brodie R. Introduction to artificial intelligence in medicine, Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies. 2019; 28(2):73-81. DOI: 10.1080/13645706.2019.1575882
27. Huang, H., Zheng, O., Wang, D. *et al*. Chat GPT for shaping the future of dentistry: the potential of multi-modal large language model. *Int. J Oral Sci*. 2023; 15:29. <https://doi.org/10.1038/s41368-023-00239-y>
28. Cortez-Vásquez A y Pro-Concepción L. La inteligencia artificial en los marcadores tumorales. *Revista de investigación de sistemas e informática*. 2023; 16(2): P.25-31.
29. Rubio-Tamayo, JL. Extended Reality, Interactivity and Immersive 3D Environments: Literature Review and Projections. *Conference: VII Congreso Internacional Ciudades Creativas*. Cartagena de Indias. 2019
30. González H, Moreno Y, D'Andrea M. Realidad virtual inmersiva como complemento en la educación odontológica: un proceso de implementación para la docencia. *Elsevier. Educación Médica*. 2024, 25(5). Santiago, Chile. DOI: 10.1016/j.edumed.2024.100931
31. Huang, T.K.; Yang, C.H.; Hsieh, Y.H.; Wang, J.C.; Hung, C.C Augmented reality (AR) and virtual reality (VR) applied in dentistry. *Kaohsiung J. Med. Sci*. 2018; 34:243-248. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2018.01>.
32. Cartes R, Bustos A. Teleodontología: Conceptos, experiencias y proyecciones. *Odontoestomatología Montevideo*. [Internet]. 2012; 14(20): 17-25. (Citado 13, septiembre, 2024). Disponible en: http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1688-93392012000200003&lng=es.
33. Morón M, La Teleodontología una Herramienta Fundamental en Tiempos de

- Pandemia y post COVID -19, su Utilidad en las Diferentes Especialidades Odontológicas. *Int. J. Odontostomat.* Bogotá 2021,15; (1): 43-50.
34. Menendez M. La revolución de la IA en la Odontología. *Dental tribune Latinoamericana*. [Internet]. Feb 2024. (Citado 25, julio, 2024). Available in: <https://la.dental-tribune.com/news/la-revolucion-de-la-ia-en-la-odontologia/>
 35. Khanagar SB, Alfadley A, Alfouzan K, Awawdeh M, Alaqla A, Jamleh A. Developments and Performance of Artificial Intelligence Models Designed for Application in Endodontics: A Systematic Review. *Diagnostics*. 2023; 13, 414. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030414>
 36. Janiesch C, Zschech P, Heinrich K. Machine learning and deep learning. *Electronic Markets*. 2021; 31(3):685-695. <https://doi.org/10.1007/s12525-021-00475-2>
 37. Rudin, C. (2019). Stop explaining black box machine learning models for high stakes decisions and use interpretable models instead. *Nature Machine Intelligence*, 1(5), 206–215. <https://doi.org/10.1038/s42256-019-0048-x>
 38. Moghimi S, Talebi M, Parisay I. Diseño e implementación de un algoritmo genético híbrido y un sistema de red neuronal artificial para predecir el tamaño de caninos y premolares no erupcionados. *Eur J Orthod*. 2012;34(4):480-486. DOI: 10.1093/ejo/cjr042
 39. Aliaga IJ, Vera V, De Paz JF, García AE, Mohamad MS. Modelling the longevity of dental restorations by means of a CBR system. *Biomed Res Int*. 2015, Mar 19; 125:88-93. DOI: 10.1155/2015/540306
 40. Thanathornwong B, Suebnukarn S, Ouivirach K. Decision support system for predicting color change after tooth whitening. *Comput Methods Programs Biomed*. 2016 Mar;125:88-93. DOI: 10.1016/j.cmpb.2015.11.004.
 41. Özden FO, Özgönenel O, Özden B, Aydoğdu A. Diagnosis of periodontal diseases using different classification algorithms: A preliminary study. *Niger J Clin Pract*. 2015 May–Jun; 18(3):416-421. DOI: <https://doi.org/10.4103/1119-3077.151785>
 42. Niño-Sandoval TC, Guevara SV, González FA, Jaque RA, Infante-Contreras C. An automatic method for skeletal patterns classification using craniomaxillary variables on a Colombian population. *Forensic Sci Int*. 2016 Apr; 261:159.e1-6. DOI: 10.1016/j.forsciint.2015.12.025
 43. Cheng C, Cheng X, Dai N, Jiang X, Sun Y, Li W. Prediction of facial deformation after complete denture prosthesis using BP neural network. *Comput Biol Med*. 2015; 66:103-12. <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2015.08.018>
 44. Moayeri R, Khalili M and Nazari M. A Hybrid Method to Predict Success of Dental Implants” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2016; 7(5). <http://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2016.070501>
 45. Sivari E, Senirkentli GB, Bostanci E et al. Deep learning in diagnosis of dental anomalies and diseases: a systematic review. 2023; 13: 2512.
 46. Majumder A, & Sen D. Artificial intelligence in cancer diagnostics and therapy: current perspectives. *Indian Journal of Cancer*, 2021; 58(4): 481–492. https://doi.org/10.4103/ijc.IJC_399_20
 47. Flores A, Rysavy S, Enciso R, Okada K. Non-invasive differential diagnosis of dental periapical lesions in cone-beam CT. 2009 *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Macro*, 2009: 566-9. DOI: 10.1109/ISBI.2009.5193110
 48. Dar-Odeh NS, Alsmadi OM, Bakri F, Abu-Hammour Z, Shehabi AA, Al-Omiri MK, Abu-Hammad SM, et al. Predicting recurrent aphthous ulceration using genetic algorithms-optimized neural networks. *Adv*.

- Appl. Bioinform Chem. 2010; 3:7-13. DOI: 10.2147/aabc.s10177
49. Jung SK, & Kim TW. New approach for the diagnosis of extractions with neural network machine learning. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2016; 149(1):127-133. DOI: 10.1016/j.ajodo.2015.07.030
 50. Xie X, Wang L, Wang A. Artificial neural network modeling for deciding if extractions are necessary prior to orthodontic treatment. *Angle Orthod*. 2010, Mar; 80(2):262-6. DOI: 10.2319/111608-588.1
 51. Mario M, Abe J, Ortega N & Del Santo JrM. Paraconsistent artificial neural network as auxiliary in cephalometric diagnosis. *Artificial Organs*, 2010; 34(7) E215-E221. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1594.2010.00994.x>
 52. Saghiri MA, Asgar K, Boukani KK, Lotfi M, Aghili H, Delvarani A, Karamifar K, et al. A new approach for locating the minor apical foramen using an artificial neural network. *International Endodontic Journal*. 2012; 45:257-265. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2591.2011.01970.x>
 53. Papantonopoulos G, Takahashi K, Bountis T, Loos BG. Artificial neural networks for the diagnosis of aggressive periodontitis trained by immunologic parameters. *PLoS One*. 2014 Mar 6; 9(3):e89757. DOI: 10.1016/j.ajodo.2015.07.030
 54. Li H, Lai L, Cheng L, Lu C, Cai Q. The Prediction in Computer Color Matching of Dentistry Based on GA+BP Neural Network. *Computational and Mathematical Methods in Medicine* 2015; (2):816719. DOI: 10.1155/2015/816719
 55. Kositbowornchai S, Sikram S, Naunsakul R, Thinkhamrop B. Root fracture detection on digital images: effect of the zoom function. *Dent Traumatol* 2003; 19: 154-9. <https://doi.org/10.1111/j.1600-9657.2012.01148.x>
 56. Kim E, Lim K, Rhee H. Predictive modeling of dental pain using neural network. *Stud Health Technol Inform*. [Internet]. 2009:146:745-6. PMID: 19592958. (Cited jul16, 2024). Available in: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19592958/>
 57. Carrillo-Perez F, Pecho OE, Morales JC, et al. Applications of artificial intelligence in dentistry: A comprehensive review. *J EsthetRestorDent*. 2022; 34(1): 259-280. DOI:10.1111/jerd.12844
 58. Hung, K.; Yeung, A.W.K.; Tanaka, R.; Bornstein, M.M. Current Applications, Opportunities, and Limitations of AI for 3D Imaging in Dental Research and Practice. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2020; 17:4424. <https://doi.org/10.3390/ijerph17124424>
 59. Mohammad-Rahimi H, Motamedian SR, Pirayesh Z, et al. Deep learning in periodontology and oral implantology: A scoping review. *J Periodontal Res* 2022; 57(5):942-951. DOI: 10.1111/jre.13037
 60. Orhan K, Bayrakdar IS, Ezhov M, Kravtsov A, Özyürek T Evaluation of artificial intelligence for detecting periapical pathosis on cone-beam computed tomography scans. *Int. Endod J*. 2020; 53:680-689. DOI: 10.1111/iej.13265
 61. Ahmed ZH, Almuharib AM, Abdulkarim AA, et al. Artificial Intelligence and Its Application in Endodontics: A Review. *J Contemp Dent Pract* 2023; 24(11):91-917.
 62. Johari M, Esmaeili F, Andalib A, Garjani S, Saberkeri H. Detection of vertical root fractures in intact and endodontically treated premolar teeth by designing a probabilistic neural network: an ex vivo study. *DentomaxillofacRadiol*. 2017 Feb; 46(2):20160107. DOI: 10.1259/dmfr.20160107
 63. Fukuda M, Inamoto K, Shibata N, et al. Evaluation of an artificial intelligence system for detecting vertical root fracture on panoramic radiography. *Oral Radiol*. 2020;

- 36:337-343. DOI: 10.1007/s11282-019-00409-x
64. Kishimoto T, Goto T, Matsuda T, Iwawaki Y, Ichikawa T. Application of artificial intelligence in the dental field: A literature review. *J Prosthodont Res.* 2022 Jan 11; 66(1):19-28. DOI: 10.2186/jpr.JPR_D_20_00139
65. Meghil M, Rajpurohit P, Awad M, McKee J, Shahoumi L y Ghaly M. Artificial intelligence in dentistry. *J. Dentistry Review.* 2022; 2(1). <https://doi.org/10.1016/j.dentre.2021.100009>.
66. Lee JH, Kim DH, Jeong SN, Choi SH. Diagnosis and prediction of periodontally compromised teeth using a deep learning-based convolutional neural network algorithm. *J Periodontal Implant Sci.* 2018 Apr 30; 48(2):114-123. DOI: 10.5051/jpis.2018.48.2.114
67. Sorihashi Y, Stephens CD, Takada K. An inference modeling of human visual judgment of sagittal jaw-base relationships based on cephalometry: part II. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2000; 117:303-11. DOI: [org/10.1016/S0889-5406\(00\)70235-6](https://doi.org/10.1016/S0889-5406(00)70235-6)
68. Hammond RM, Freer TJ. Application of a case-based expert system to orthodontic diagnosis and treatment planning: a review of the literature. *AustOrthod J.* 1996 Oct; 14(3):150-3. PMID: 9528413.
69. Hiraiwa T, Arijji Y, Fukuda M, et al.. A deep-learning artificial intelligence system for assessment of root morphology of the mandibular first molar on panoramic radiography. *DentomaxillofacRadiol.* 2019;48:20180218. DOI: 10.1259/dmfr.20180218
70. Ngoc VTN, Viet DH, Anh LK, et al. Periapical Lesion Diagnosis Support System based on X-ray Images Using Machine Learning Technique. *World J Dent* 2021; 12(3):189-193.
71. Poedjiastoeti W, Suebnukarn S. Application of Convolutional Neural Network in the Diagnosis of Jaw Tumors. *Healthc Inform Res.* 2018 Jul;24(3):236-241. DOI: 10.4258/hir.2018.24.3.236.
72. Issa J, Jaber M, Rifai I, et al. Diagnostic Test Accuracy of Artificial Intelligence in Detecting Periapical Periodontitis on Two-Dimensional Radiographs: A Retrospective Study and Literature Review. *Medicina (B Aires)* 2023; 59(4):768. DOI: 10.3390/medicina59040768
73. Mao YC, Chen TY, Chou HS, Lin SY, Liu SY, Chen YA, et al. Caries and Restoration Detection Using Bitewing Film Based on Transfer Learning with CNNs. *Sensors* 2021; 21:4613. <https://doi.org/10.3390/s21134613>
74. Bayraktar Y, Ayan E. Diagnosis of interproximal caries lesions with deep convolutional neural network in digital bitewing radiographs. *Clin Oral Investig.* 2022 Jan; 26(1):623-632. DOI: 10.1007/s00784-021-04040-1.
75. Revilla-León, Marta et al. Modelos de inteligencia artificial para prótesis fijas y removibles dentosoportadas: una revisión sistemática. *Revista de Odontología Protésica*, 129 (2): 276 - 292
76. Khanagar S, Alfadley A, Alfouzan K, Awawdeh M, Alaqla A, Jamleh, A. Developments and Performance of Artificial Intelligence Models Designed for Application in Endodontics: A Systematic Review. *Diagnostics* 2023; 13:414. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030414>
77. Miki Y, Muramatsu C, Hayashi T, Zhou X, Hara T, Katsumata A, Fujita H. Classification of teeth in cone-beam CT using deep convolutional neural network. *Comput Biol Med.* 2017 Jan 1; 80:24-29. DOI: 10.1016/j.compbiomed.2016.11.003.
78. Shafi I, Fatima A, Afzal H, Díez I, Lipari V, Breñosa J, Ashraf I. A Comprehensive Review of Recent Advances in Artificial Intelligence for Dentistry E-Health. *Diagnostics* 2023; 13:2196. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13132196>



79. Hegazy MAA, Cho MH, Lee SY. Image denoising by transfer learning of generative adversarial network for dental CT. *BiomedPhysEng Express*. 2020; Sep 8; 6(5):055024. DOI: 10.1088/2057-1976/abb068.
80. Hu Z, Jiang C, Sun F, Zhang Q, Ge Y, Yang Y, Liu X, et al. Artifact correction in low-dose dental CT imaging using Wasserstein generative adversarial networks. *Med Phys*. 2019 Apr; 46(4):1686-1696. DOI: 10.1002/mp.13415.
81. Khaled Saab et al. Capabilities of Gemini Models in Medicine. Cornell University. arXiv:2404.18416v2. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.18416>
82. Achiam S, Adler S, Agarwal L, Ahmad I, Akkaya F, Aleman D., et al. GPT-4 technical report. arXiv preprint 2023; arXiv:2303.08774.
83. Saeed A, Alkhurays M, AlMutlaqah M, AlAzbah M, Alajlan SA. Future of Using Robotic and Artificial Intelligence in Implant Dentistry. *Cureus*. 2023 Aug 9; 15(8):e43209. DOI: 10.7759/cureus.43209.
84. European Union. Regulation of the European Parliament and of the Council. Official Journal. [Internet]. 2024/1689. (Cited: sept, 15, 2024). Available in: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32024R1689>

