

Estado del arte de inteligencia artificial en ortodoncia. Revisión narrativa.

State of the art on artificial intelligence in orthodontics. A narrative review.

R. Morales Bravo*, L. Pisón Santana*, A. Hidalgo Rivas**, E. Palma Díaz**

RESÚMEN

Introducción: Inteligencia artificial (IA) es la automatización de actividades vinculadas con procesos de pensamiento humano. En ortodoncia se han desarrollado sistemas que asistidos por IA pueden tomar decisiones terapéuticas y realizar análisis. No existe un compendio actualizado sobre el uso de IA en ortodoncia.

Objetivos: Describir los usos de IA en ortodoncia de acuerdo con la literatura actual.

Metodología: Se realizó una revisión narrativa en las bases Medline y SciELO mediante la búsqueda: (orthodont*) AND (“machine learning” OR “deep learning” OR “artificial intelligence” OR “neural network”).

Resultados: Se obtuvieron 19 artículos que mostraron que IA se ha desarrollado en cinco áreas: 1) Cefalometría asistida por IA, donde la localización de puntos y análisis cefalométricos mostraron una precisión igual a ortodontistas. 2) Localización de dientes no erupcionados en CBCT, con resultados similares entre IA y ortodontistas. 3) Determinación de edad y maduración ósea de forma más eficiente apoyada por IA, que por métodos convencionales, 4) Análisis facial, donde la IA permite una evaluación objetiva del atractivo facial, con aplicaciones en diagnóstico y planificación quirúrgica. 5) Decisiones terapéuticas con IA, para determinar la necesidad de exodoncias y dientes que serán extraídos.

Discusión: La IA se está incorporando aceleradamente en ortodoncia, por lo que debe conocerse conceptos y posibilidades que brinda.

Conclusiones: Un número creciente de artículos sobre usos de IA en ortodoncia muestran resultados similares con IA a los obtenidos por especialistas. Sin embargo, la evidencia aún es poca y principalmente experimental, por lo que la IA debiera usarse cautelosamente en ortodoncia.

PALABRAS CLAVE: Inteligencia artificial, ortodoncia, cefalometría.

ABSTRACT

Introduction: Artificial Intelligence (AI) is the automation of activities related to human thought processes. In orthodontics, systems have been developed which, assisted by AI, can make therapeutic decisions and perform analyses. There is no updated compendium on the use of AI in orthodontics.

Objectives: To describe the uses of AI in orthodontics according to the current literature. **Methodology:** A narrative review was performed in the Medline and SciELO bases by means of the following search: (orthodont*) AND (“machine learning” OR “deep learning” OR “artificial intelligence” OR “neural network”).

Results: 19 articles were obtained, showing that AI has been developed in four areas: 1) IA assisted cephalometry, where localization of cephalometric points and cephalometric analysis showed equal accuracy than orthodontists. 2) Unerupted tooth localization with CBCT, with similar results between AI and orthodontists. 3) Determination of skeletal age, which is more efficient with AI than with conventional methods.

* Alumno Programa de Especialización en Ortodoncia y Ortopedia Dentofacial. Universidad de Talca, Talca, Chile.

** Docente Programa de Especialización en Ortodoncia y Ortopedia Dentofacial. Universidad de Talca, Talca, Chile.

4) Facial analysis, where AI allows an objective evaluation of facial attractiveness with applications in diagnosis and surgical planning. 5) Therapeutic decisions with AI, to determine the need for exodontia and teeth to be extracted.

Discussion: AI is being incorporated rapidly in orthodontics, so we must know concepts and possibilities that it gives us in orthodontics. **Conclusions:** An increasing number of articles refer to the uses of AI in orthodontics, with similar results to those obtained by specialists. However, the evidence is still scarce and mainly experimental, so AI should still be used with caution in orthodontics.

KEY WORDS: Artificial intelligence, orthodontics, cephalometry.

Fecha de recepción: 9 de julio de 2020.

Fecha de aceptación: 26 de julio de 2020.

R. Morales Bravo, L. Pisón Santana, A. Hidalgo Rivas, E. Palma Díaz. *Estado del arte de inteligencia artificial en ortodoncia. Revisión narrativa.* 2022; 38 (4): 156-163.

INTRODUCCIÓN

La Inteligencia Artificial (IA) se ha definido como la automatización de actividades que se vinculan con procesos de pensamiento humano, tales como la toma de decisiones, resolución de problemas y aprendizaje.⁽¹⁾

La IA se puede subdividir en IA fuerte, que busca imitar a la inteligencia humana con su capacidad universal de resolver problemas y en IA débil, que busca usar mecanismos lógicos para resolver tareas intelectuales específicas.⁽²⁾

Como parte de la IA débil destaca el aprendizaje automático (ML, del inglés *machine learning*), que tiene la capacidad de aprender sin ser programado, y puede ser supervisado o no supervisado, dependiendo de la información que le entrega el operador.⁽³⁾ Las unidades estructurales de ML son algoritmos, los cuales permiten clasificar información, generalizar y realizar predicciones.⁽⁴⁾

La IA puede ser usada en numerosas áreas, especialmente en aquellas que necesitan superar problemas de alta complejidad desde el punto de vista lógico y en simulaciones que requieren alta precisión.⁽⁵⁾ En el área médica, la aplicación de IA tiene una rama virtual, relacionada con el ML y otra física, que corresponde a dispositivos médicos y robots que participan en la prestación de atención médica, principalmente en cirugía.⁽⁶⁾ El desarrollo de la IA ha permitido la creación de modelos de predicción automática de riesgo de enfermedad, detección de anomalías o patologías, diagnóstico de

enfermedades y evaluación del pronóstico.⁽¹⁾

En odontología, la IA se ha hecho más habitual, aunque está menos desarrollada que en medicina.⁽⁵⁾ La IA se ha usado para detectar caries en imágenes con transiluminación.⁽⁷⁾ Se ha creado con IA un modelo exitoso predictivo de dolor dental.⁽⁸⁾ También se ha predicho la recurrencia de carcinoma escamocelular de lengua.⁽⁹⁾ En cirugía ortognática, se han creado modelos que buscan predecir la necesidad de cirugía, el tipo de cirugía y la necesidad de exodoncias.⁽¹⁰⁾

La ortodoncia no ha quedado al margen de este desarrollo asociado a la IA, sin embargo, a la fecha no existe un compendio actualizado de la información más relevante de los aportes de la IA en ortodoncia. El propósito de la presente revisión es describir los usos de IA en ortodoncia de acuerdo con la literatura actual. Se realizó una revisión narrativa acerca de avances en ortodoncia en relación con el uso de IA.

MATERIAL Y MÉTODOS

La búsqueda de artículos se hizo en las bases de datos Medline y SciELO en abril de 2020 usando los siguientes descriptores y operadores booleanos: (*orthodont**) AND (*“machine learning”* OR *“deep learning”* OR *“artificial intelligence”* OR *“neural network”*). La búsqueda se adaptó a cada base de datos. La selección de artículos fue realizada por dos revisores (RM y LP).

Los criterios de inclusión fueron: presencia del des-

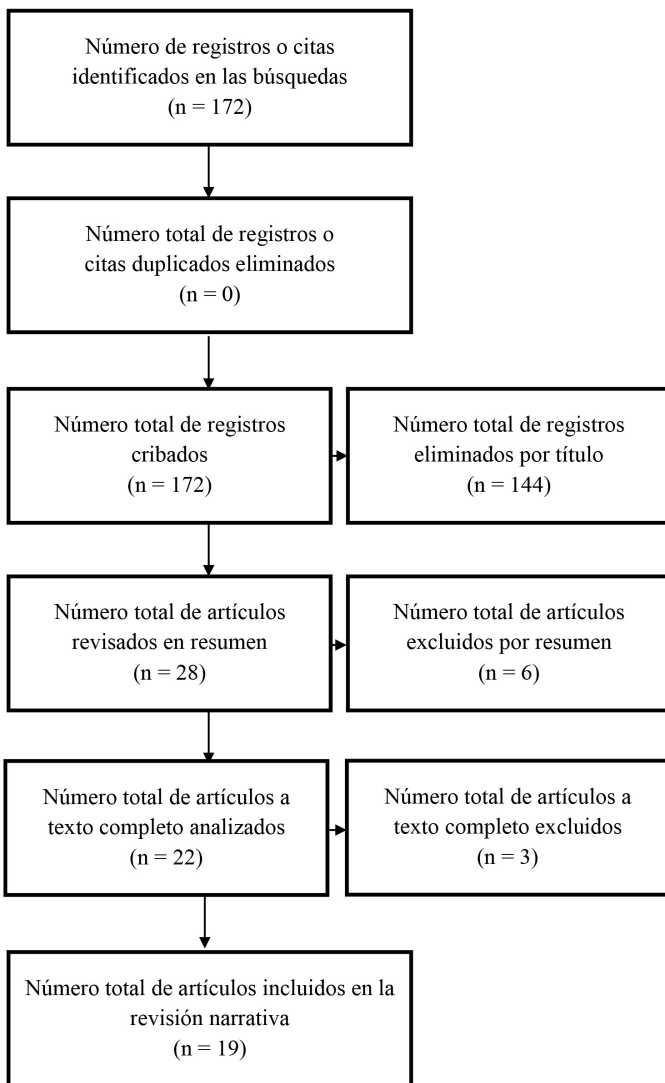


Figura 1. Diagrama del proceso de selección de artículos.

criptor (*orthodont**) y al menos uno de los otros descriptores en el título y resumen, estudios originales, estudios piloto, revisiones sistemáticas con o sin meta análisis, revisiones narrativas, publicaciones de los últimos 5 años (abril 2015 a abril 2020), con resumen disponible en la base de datos. Como criterios de exclusión se consideró: editoriales, opiniones de especialistas, artículos de libros y estudios no relacionados con la práctica de la ortodoncia clínica.

Se realizó una remoción manual de los artículos duplicados. Se evaluó primero títulos y luego resúmenes, incluyéndose los artículos que cumplieran con los criterios de elegibilidad. En caso de duda en la decisión de incluir el artículo según título, se incluyó el artículo para evaluación de re-

Método de IA	Características	Usos en Ortodoncia
Basados en regresión (RBM, del inglés <i>regression based methods</i>)	Determina la influencia de variables independientes sobre una dependiente y representa esta relación a través de una función no determinística. ⁽¹¹⁾	Determinación de maduración ósea. ⁽¹²⁾
Bosque aleatorio (RF, del inglés <i>randomforest</i>)	Se basa en el ensamblado de grupos de árboles de decisión con subgrupos de la información o características a estudiar. Una de sus funciones principales es clasificar. ⁽¹³⁾	Segmentación de maxilar y mandíbula en volúmenes de tomografía computarizada de haz cónico. ⁽¹³⁾
Agrupamiento difuso (FC, del inglés <i>fuzzy clustering</i>)	Consiste en la partición de un número determinado de elementos en grupos donde un elemento tiene un mayor grado de pertenencia. ⁽¹⁴⁾	Predicción de tratamiento. ⁽¹⁴⁾
Redes neuronales artificiales (ANN, del inglés <i>artificial neural networks</i>)	Realiza análisis multifactoriales. Tiene una estructura con múltiples capas: una de ingreso, una o más capas ocultas y una capa de resultados. Se entrenan con series de información ya clasificada. ⁽¹¹⁾	Determinación de maduración ósea ⁽¹²⁾ , necesidad de exodoncias ⁽¹⁵⁾ .
Redes neuronales convolucionales (CNN, del inglés <i>convolutional neural networks</i>)	Es un tipo de algoritmo de aprendizaje profundo, corresponde a una especialización de ANN. Diseñado para procesar información que muestra invariancia espacial. ⁽¹¹⁾ Esta IA requiere un gran número de imágenes etiquetadas desde bases de datos para el entrenamiento. ⁽¹⁶⁻¹⁸⁾	Determinación de maduración ósea ⁽¹⁹⁾ , localización automática de puntos cefalométricos ^(16,20-23) , en cirugía ortognática, determinación de atractivo facial y edad aparente. ^(17,18)

sumen. En caso de duda en la decisión de incluir el artículo según resumen, se incluyó para su evaluación a texto completo. Los artículos incluidos a texto completo se evaluaron por ambos revisores (LP y RM) de forma independiente, para decidir su inclusión en la presente revisión. En caso de desacuerdo en la decisión de incluir un artículo a texto completo, los revisores discutieron la decisión hasta llegar a un acuerdo.

El proceso de selección de artículos se mostró mediante un diagrama. Se elaboró una síntesis narrativa de los métodos de IA usados en ortodoncia y las principales áreas de desarrollo de IA en ortodoncia.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra el proceso de selección de artículos.

Del total de artículos incluidos, 16 fueron artículos de investigación, 1 revisión sistemática y 2 revisio-

nes narrativas.

De acuerdo con la presente revisión, las áreas encontradas de desarrollo de IA en ortodoncia son: 1) cefalometría, 2) localización dentaria, 3) determinación radiográfica de edad y maduración ósea, 4) análisis de morfología facial y 5) decisiones terapéuticas.

Para entender los usos de IA es necesaria una breve explicación de los métodos de IA más usados en ortodoncia (Tabla 1).

ÁREAS DE DESARROLLO DE IA EN ORTODONCIA

a) Usos de IA en cefalometría

La cefalometría es una parte esencial del tratamiento de ortodoncia, pues ayuda a predecir patrones de crecimiento, diagnosticar y planificar terapias ortodóncicas.⁽²⁰⁾ La localización de puntos cefalométricos en telerradiografías de perfil se ha realizado con CNN con diferentes grados de complejidad, que muestran consistencia entre sus resultados.^(7,16,20,22) Al comparar la localización de puntos cefalométricos entre CNN y un examinador humano, se ha encontrado una diferencia promedio que no supera el milímetro, con una alta concordancia entre múltiples mediciones.^(16,20) Respecto al análisis cefalométrico, la CNN tiene un desempeño comparable a ortodontistas expertos, con la ventaja que la CNN puede realizar un análisis cefalométrico completo en menos de un segundo.^(16,23)

En relación a localización automática de puntos cefalométricos en exámenes 3D, las CNN son las más usadas, mostrando mejor rendimiento en pacientes simétricos, con resultados cercanos a los logrados por un operador humano.⁽²¹⁾ Con respecto a la exactitud del uso de CNN, el error en la localización de puntos fue en promedio de $5,785 \pm 0,980$ mm.⁽²¹⁾ En dicha investigación, los resultados fueron afectados negativamente debido a la inclusión de pacientes asimétricos, en los que hubo hasta tres veces mayor desviación en la localización.⁽²¹⁾

b) Usos de IA en localización de dientes no erupcionados

Desde la década pasada, la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT, del inglés *cone-beam*

computed tomography) se ha usado incrementalmente para situaciones complejas en la región oral y maxilofacial.⁽²⁴⁾ A través de IA basada en RF, se ha desarrollado un análisis tridimensional (3D) que segmenta automáticamente imágenes de CBCT y luego realiza un análisis volumétrico automático por conteo de voxels para dientes no erupcionados. Una de las técnicas actuales para localización automática de dientes no erupcionados en 3D, consiste en extraer la información del archivo y transformarlo en imágenes en dos dimensiones, lo que reduce los costos computacionales.⁽²¹⁾ La IA en análisis 3D ha sido validada, mostrando resultados precisos al compararse con la misma evaluación, pero hecha por humanos.⁽¹³⁾

c) Usos de IA en determinación radiográfica de edad y maduración ósea

La determinación radiográfica del grado de maduración y edad ósea permite apoyar el diagnóstico y tratamiento en ortodoncia, pues por sí sola, la edad cronológica no refleja completamente la etapa de crecimiento de un individuo.^(11,12) El examen más usado para la determinación del grado de maduración y edad ósea es la radiografía convencional, por sobre la tomografía computarizada y la resonancia magnética.⁽¹¹⁾ Los métodos para determinación de edad ósea más usados se hacen con radiografía de mano y muñeca y estos son Greulich-Pyle (GP) y Tanner-Whitehouse (TW).^(11,19)

Se ha descrito que los métodos para determinación radiográfica del grado de maduración y edad ósea convencionales, presentan gran variabilidad intra e interoperador, lo cual puede ser disminuido con la ayuda de IA.⁽¹⁹⁾ Los sistemas de determinación de maduración y edad ósea con IA pueden ser automáticos o requerir supervisión humana.⁽¹²⁾ Estos sistemas usan identificación de puntos, seguido de una segmentación automática, que corresponde a la división de una imagen en partes más pequeñas, para así simplificar su análisis.^(11,19)

Para el método TW se ha diseñado una CNN que procesa la imagen como un todo, y ha mostrado ser efectiva y exacta para evaluar edad ósea en pacientes de 0 a 18 años de diferentes razas y géneros.⁽¹⁹⁾ La IA muestra un error de entre 5 y 10 meses en evaluación de edad ósea al compararse con medición manual.^(11,19)

Por otro lado, la maduración ósea ha sido determinada con IA en vértebras cervicales, usando la evaluación de etapas cervicales (CVS) de Hassel y Farman. Al compararse distintos métodos de IA que evalúan CVS, los mejores resultados se obtienen con ANN, sin embargo, con un desempeño inferior a especialistas.⁽¹²⁾

d) Usos de IA en análisis de morfología facial

La principal motivación de un paciente para un tratamiento ortodóncico con o sin componente ortognático, es mejorar su apariencia facial.⁽¹⁷⁾ Además, la apariencia facial se considera crucial para medir el resultado del tratamiento por parte del ortodoncista o cirujano maxilofacial.⁽¹⁸⁾

Respecto al análisis de la morfología facial mediante IA, la investigación se ha centrado en dos áreas: evaluación de atractivo facial y estimación de edad aparente.

Se ha desarrollado un método automatizado de evaluación de atractivo facial mediante IA. Este consiste en un detector facial y una CNN que extraen las características faciales, luego las estructura y combina, y finalmente clasifica el rostro según el atractivo basándose en una Escala Visual Análoga (VAS).^(17,18) En pacientes fisurados se ha replicado la evaluación de atractivo facial mediante CNN, con resultados similares entre especialistas y personas sin conocimiento especializado. Sin embargo, la IA tiende a subvalorar las características faciales en pacientes fisurados, en comparación con pacientes sin malformaciones, ya que analiza el rostro como un todo.⁽¹⁸⁾

También, a través de CNN se ha estimado la edad aparente, que corresponde a la diferencia entre la edad real del paciente y la estimada por la IA, pre y post cirugía ortognática. Las edades determinadas por la CNN muestran que los pacientes parecen 1,75 años mayores que su edad real antes del tratamiento, pero solo 0,82 años mayores después del tratamiento.⁽¹⁷⁾

e) Usos de IA en decisiones terapéuticas

En la presente revisión destacan las siguientes áreas: necesidad de tratamiento ortodóncico, necesidad de exodoncias, identificación de dientes a extraer, necesidad de anclaje, cirugía ortognática y pronóstico del tratamiento ortopédico y orto-

dóncico para pacientes de clase III esquelética.

En relación con la decisión de necesidad de tratamiento de ortodoncia, se han elaborado sistemas exitosos en base a variables como sobremordida, clase esquelética y apiñamiento entre otras, que mostraron un alto grado de concordancia con ortodoncistas.⁽²⁵⁾ Basado en las mismas variables, también han sido exitosos sistemas de ANN para predecir necesidad de exodoncias, identificación de dientes a extraer y necesidad de anclaje, con un 93%, 84% y 92% de precisión, respectivamente.^(15,26,27)

En el área de cirugía ortognática, usando ANN se han clasificado con éxito pacientes de acuerdo con la necesidad y tipo de cirugía, así como en cuanto a la necesidad de exodoncias. La ANN obtuvo un 96% y 91% de éxito en la decisión de necesidad de cirugía y el tipo de cirugía respectivamente, tanto en clases II como clases III, en comparación con un ortodoncista con 10 años de experiencia, considerado como gold standard.⁽¹⁰⁾ En cuanto a la necesidad de exodoncias, la ANN obtuvo cerca de un 90% de éxito.⁽¹⁰⁾

En el pronóstico de tratamientos ortopédicos y ortodóncicos de pacientes clase III, se ha encontrado que el uso del método de FC es efectivo para predecir el éxito del tratamiento.⁽¹⁴⁾ Este método agrupa diferentes variables clínicas y exámenes complementarios para agrupar los pacientes en tres grupos: con longitud mandibular aumentada, hiperdivergentes y balanceados. En la investigación de Auconi et al, cada paciente podía pertenecer a más de un grupo, pero con diferentes porcentajes de pertenencia. Se observó que en el grupo de pacientes balanceados, todos los tratamientos fueron exitosos, mientras que el de hiperdivergentes y longitud mandibular aumentada entre 28,6% y 33,3% fracasaron.⁽¹⁴⁾ La IA ayuda a entender las interacciones de los componentes en crecimiento y permite predecir qué casos responderán con éxito al tratamiento.⁽¹⁴⁾

DISCUSIÓN

La presente revisión narrativa analizó la incorporación de IA en distintas áreas de la ortodoncia. No se encontró revisiones actualizadas sobre este tema.

De los métodos de IA usados en los artículos seleccionados en la presente revisión, el 47% corres-

ponde a CNN. El mayor uso de CNN puede relacionarse con el creciente aumento de los análisis con exámenes de CBCT, ya que las CNN presentan un mejor desempeño en análisis de imágenes⁽²⁸⁾. Sin embargo, puede ser una desventaja para la aplicación clínica de la CNN, la gran cantidad de imágenes necesarias para su entrenamiento y la poca disponibilidad de bases públicas de datos.⁽¹⁹⁾ Si bien hay una tendencia a usar cada vez más CNN en ortodoncia, esto no implica necesariamente que sea el mejor método para resolver cualquier problema en esta especialidad.⁽¹⁹⁾ Cada método de IA tiene áreas en las que destaca, por lo que entender el funcionamiento y ventajas lleva a mejores resultados en su aplicación.

Para disminuir la cantidad imágenes necesarias para el entrenamiento, se pueden utilizar ANN previamente entrenadas con imágenes de uso general, es decir, no relacionadas con el área específica. Sin embargo, el uso de imágenes relacionadas con el área específica da mejores resultados.⁽¹⁹⁾ Reducir el número de imágenes necesarias para el entrenamiento podría lograr un mayor uso de ANN y CNN en ortodoncia, donde es poco frecuente contar con grandes volúmenes de imágenes clasificadas, y mucho menos que sean de uso público.

En análisis cefalométrico, el uso de CNN se considera un método de IA exitoso y confiable. Éste muestra una diferencia en la ubicación de puntos menor a 2 mm con respecto a un ortodontista experto,⁽²⁹⁾ esta diferencia ha mostrado no tener impacto clínico.⁽²³⁾ Si bien el análisis cefalométrico asistido con IA ha alcanzado un nivel de automatización avanzado, existen problemas inherentes a la técnica radiográfica, tales como superposición de estructuras bilaterales y distorsión en la toma de la radiografía.⁽³⁰⁾ Por esto, de a poco se ha ido incorporando la cefalometría 3D, por tener mejor reproducibilidad entre operadores y la posibilidad de obtener mayor información, comparada con la radiografía convencional.⁽³⁰⁾ A diferencia del análisis en dos dimensiones, el rendimiento de localización de puntos cefalométricos con IA en CT o CBCT aún no es suficientemente preciso para que sea recomendado su uso sin corrección manual.⁽²¹⁾ Se ha descrito que las imágenes de CT y CBCT con menor calidad, artefactos o áreas de difícil localización disminuyen el rendimiento de la IA en la localización de puntos y estructuras.^(1,13,21) La evaluación con IA de puntos cefalométri-

cos en CBCT tiene otra desventaja al aplicarse en pacientes asimétricos, donde al compararse con la evaluación hecha por especialistas, se observa una amplia variación.⁽¹³⁾

La segmentación de imágenes 3D es otra área en la que es altamente deseable la automatización. Esto, debido a que cuando se realiza de forma manual es extenuante y difícil,⁽³¹⁾ y presenta un grado de dificultad que impide la difusión para su aplicación clínica.⁽³²⁾ La segmentación automatizada de imágenes 3D a través de IA, puede ser aplicada en investigaciones en ortodoncia para simplificar los análisis y generar nuevo conocimiento. La segmentación y el análisis volumétrico de los maxilares en CBCT pueden entregar información ampliada sobre el efecto del ambiente, el tratamiento ortopédico y ortodóntico en el crecimiento y los cambios en la arquitectura ósea.⁽¹³⁾ También pueden permitir el desarrollo de nuevas técnicas para su uso clínico, como la comparación volumétrica de maxilares con caninos no erupcionados.⁽¹³⁾

La maduración ósea puede ser evaluada en vértebras cervicales, con una concordancia alta con el análisis de mano y muñeca.⁽³³⁾ Esta alta concordancia hace ideal el uso de la evaluación de vértebras cervicales en ortodoncia, ya que la telerradiografía lateral es un examen frecuentemente usado en esta especialidad. Sin embargo, aún los resultados obtenidos con el uso de IA no son concordantes con los obtenidos por especialistas,⁽¹¹⁾ por lo que aún se requiere un mayor desarrollo en esta área para tener un resultado confiable.

El uso de aprendizaje profundo ha mostrado que los métodos convencionales de evaluación de maduración y edad ósea, como los de mano y muñeca, usan un número de características visuales que podría reducirse. Esto, debido a que la IA no usa algunas características visuales, lo que ha mostrado no influir significativamente en el resultado final.⁽¹⁹⁾ El uso de IA podría tener un rol no solo en la automatización, sino también en la optimización de los métodos que actualmente están validados para su uso.

Con respecto a la evaluación de atractivo facial, actualmente es subjetiva, pues está influenciada por la experiencia de cada evaluador.⁽¹⁸⁾ El uso de IA puede eliminar la subjetividad de esta evaluación e influir en la forma en que se diagnostica.^(18,24) Si

bien la IA muestra gran objetividad en sus resultados, es importante considerar la variabilidad entre diferentes culturas, etnias y comunidades respecto a los cánones de belleza.⁽³⁴⁾ En la presente revisión no se encontraron artículos que consideren variabilidad cultural para atractivo facial.

El método de IA denominado FC ha mostrado ser útil para clasificar pacientes de Clase III en crecimiento, siendo capaz de encontrar tres patrones de crecimiento distintos.⁽¹⁴⁾ Estos patrones se asemejan bastante a la realidad, en cuanto a pacientes que responden bien a la terapéutica, como en cuanto a aquellos que alcanzan resultados insatisfactorios.⁽¹⁴⁾ En un mismo paciente pueden coexistir distintas variables esqueléticas, a veces contrarias a la generalidad del patrón de crecimiento.⁽¹⁴⁾ La IA basada en FC permitiría planificar de forma más precisa tratamientos de acuerdo con los diferentes patrones de crecimiento y poder tener un pronóstico más cercano a la realidad. En la presente revisión se encontró investigación centrada en pacientes clases III, pero también podría ser aplicada en otras clases esqueléticas.

CONCLUSIONES

El uso de la IA en ortodoncia es reciente, en continuo desarrollo y con varias áreas avanzando de manera independiente. Los sistemas desarrollados con IA en ortodoncia muestran resultados similares a ortodontistas en áreas como cefalometría, localización de dientes no erupcionados, determinación de edad ósea, e incluso en decisiones terapéuticas. Pese a lo práctico de un sistema completamente automatizado mediante IA, el estado de desarrollo actual indica que aún es necesario que la decisión final quede en manos del ortodontista. Además de requerir supervisión de las decisiones que tome el sistema con IA, se deben conocer sus limitaciones y validar los resultados fundamentándose en la experiencia del ortodontista.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hung K, Montalvao C, Tanaka R, Kawai T, Bornstein M. The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: a systematic review. *Dentomaxillofac Radiol* 2019; 48:20190107.
2. Zackova E. Intelligence explosion quest for humankind. En Romportl J, Zackova E, Kelemen J. Beyond artificial

intelligence: the disappearing human-machine divide. *Topics in Intelligent Engineering and Informatics*. Springer: Cham; 2015.

3. Esteva A, Robicquet A, Ramsundar B, Kuleshov V, DePristo M, Chou K, Cui C, Corrado G, Thrun S, Dean J. A guide to deep learning in healthcare. *Nat Med* 2019; 25:24-9.
4. Kapoor R, Walters SP, Al-Aswad LA. The current state of artificial intelligence in ophthalmology. *Surv Ophthalmol* 2019; 64:233-40.
5. Park W, Park J. History and application of artificial neural networks in dentistry. *Eur J Dent* 2018; 12:594-601.
6. Hamet P, Tremblay J. Artificial intelligence in medicine. *Metabolism* 2017; 69:36-40.
7. Schwendicke F, Golla T, Dreher M, Krois J. Convolutional neural networks for dental image diagnostics: a scoping review. *J Dent* 2019; 91:103226.
8. Kim EY, Lim KO, Rhee HS. Predictive modeling of dental pain using neural network. *Stud Health Technol Inform*. 2009; 146:745-6.
9. Alabi RO, Elmusrati M, Sawazaki-Calone I, Kowalski LP, Haglund C, Coletta RD, Mäkitie A, Salo T, Leivo I, Almangush A. Machine learning application for prediction of locoregional recurrences in early oral tongue cancer: a web-based prognostic tool. *Virchows Arch* 2019;475:489-97.
10. Choi HI, Jung SK, Baek SH, Lim WH, Ahn SJ, Yang IH, Kim TW. Artificial intelligent model with neural network machine learning for the diagnosis of orthognathic surgery. *J Craniofac Surg*. 2019;30:1986-9.
11. Dallora A, Anderberg P, Kvist O, Mendes E, Diaz S, Santmartin J. Bone age assessment with various machine learning techniques: a systematic literature review and meta-analysis 2019. *PLoS ONE*; 14:e0220242.
12. Kök H, Merve A, Said M. Usage and comparison of artificial intelligence algorithms for determination of growth and development by cervical vertebrae stages in orthodontics. *Prog Orthod* 2019; 20:41-50.
13. Chen S, Wang L, Li G, Wu TH, Diachina S, Tejera B, Kwon JJ, Lin FC, Lee YT, Xu T, Shen D, Ko CC. Machine learning in orthodontics: Introducing a 3D auto-segmentation and auto-landmark finder of CBCT images to assess maxillary constriction in unilateral impacted canine patients. *Angle Orthod* 2020; 90:77-84.
14. Auconi P, Scanzocchio M, Cozza P, McNamara JA, Franchi L. Prediction of Class III treatment outcomes through orthodontic data mining. *Eur J Orthod* 2014; 37:257-67.
15. Jung S, Kim T. New approach for the diagnosis of extractions with neural network machine learning. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2016; 149:127-33.
16. Hwang HW, Park JH, Moon JH, Yu Y, Kim H, Her SB, Srinivasan G, Aljanabi MNA, Donatelli RE, Lee SJ. Automated identification of cephalometric landmarks: part 2-might it be better than human?. *Angle Orthod* 2020; 90:69-76.
17. Patcas R, Bernini D, Volokitin A, Agustsson E, Rothe R, Timofte R. Applying artificial intelligence to assess the impact of orthognathic treatment on facial attractiveness and estimated age. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2019; 48:77-83.
18. Patcas R, Timofte R, Volokitin A, Agustsson E, Eliades

- T, Eichenberger M, Bornstein M. Facial attractiveness of cleft patients: a direct comparison between artificial-intelligencebased scoring and conventional rater groups. *Eur J Orthod* 2019; 41:428-33.
19. Spampinato C, Palazzo S, Giordano D, Aldinucci M, Leonardi R. Deep learning for automated skeletal bone age assessment in x-ray images. *Med Image Anal* 2017; 36:41-51.
 20. Yu HJ, Cho SR, Kim MJ, Kim WH, Kim JW, Choi J. Automated skeletal classification with lateral cephalometry based on artificial intelligence. *J Dent Res* 2020; 99:249-56.
 21. Ma Q, Kobayashi E, Fan B, Nakagawa K, Sakuma I, Masamune K, Suenaga H. Automatic 3D landmarking model using patch-based deep neural networks for CT image of oral and maxillofacial surgery. *Int J Med Robot* 2020; 16:e2093.
 22. Park JH, Hwang HW, Moon JH, Yu Y, Kim H, Her SB, Srinivasan G, MNA Aljanabi, Donatelli RE, Lee SJ. Automated identification of cephalometric landmarks: part 1-comparisons between the latest deep-learning methods YOLOV3 and SSD. *Angle Orthod* 2019; 89:903-9.
 23. Kunz F, Stellzig-Eisenhauer A, Zeman F, Boldt J. Artificial intelligence in orthodontics: evaluation of a fully automated cephalometric analysis using a customized convolutional neural network. *J Orofac Orthop* 2020; 81:52-68.
 24. Allareddy V, Venugopalan SR, Nalliah RP, Caplin JL, Lee MK, Allareddy V. Orthodontics in the era of big data analytics. *Orthod Craniofac Res* 2019; 22 Supl 1:8-13.
 25. Thanathornwong B. Bayesian-based decision support system for assessing the needs for orthodontic treatment. *Healthc Inform Res* 2018; 24:22-8.
 26. Takada K. Artificial intelligence expert systems with neural network machine learning may assist decision-making for extractions in orthodontic treatment planning. *J Evid Based Dent Pract* 2016; 16:190-2.
 27. Li P, Kong D, Tang T, Su D, Yang P, Wang H, Zhao Z, Liu Y. Orthodontic treatment planning based on artificial neural networks. *Sci Rep* 2019; 9:2037.
 28. Yamashita R, Nishio M, Do RKG, Togashi K. Convolutional neural networks: an overview and application in radiology. *Insights Imaging* 2018; 9:611-29.
 29. Leonardi R, Giordano D, Maiorana F, Spampinato C. Automatic cephalometric analysis. *Angle Orthod* 2008; 78: 145-51.
 30. Navarro R, Oltramari-Navarro P, Fernandes T, Oliveira G, Conti A, Almeida M, Almeida R. Comparison of manual, digital and lateral CBCT cephalometric analyses. *J Appl Oral Sci* 2013; 21:167-76.
 31. Torosdagli N, Liberton DK, Verma P, Sincan M, Lee JS, Bagci U. Deep geodesic learning for segmentation and anatomical landmarking. *IEEE Trans Med Imaging* 2019; 38:919-31.
 32. Wang L, Gao Y, Shi F, Li G, Chen KC, Tang Z, Xia J, Shen D. Automated segmentation of dental CBCT image with prior-guided sequential random forests. *Med Phys* 2016; 43:336-46.
 33. Szemraj A, Wojtaszek-Słomi ska A, Racka-Pilszak B. Is the cervical vertebral maturation (CVM) method effective enough to replace the hand-wrist maturation (HWM) method in determining skeletal maturation?-a systematic review. *Eur J Radiol* 2018; 102:125-8.
 34. Solmaz I, Raberin M. Is the ethnic factor an orthodontic therapeutic instructor?. *Orthod Fr* 2011; 82:347-58.

DIRECCIÓN DE CONTACTO

Edgard Palma Díaz
Programa de Especialización en Ortodoncia y Ortopedia
Dentofacial
Escuela de Graduados
Universidad de Talca
Campus Talca, Talca
Chile
Teléfono (+56-71) 2201681
Email: epalma@utalca.cl