



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA
FACULTAD DE MEDICINA

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIRUGÍA Y
ODONTOESTOMATOLOGÍA**

TESIS DOCTORAL

**PREPARACIÓN DE CAVIDADES DE ACCESO ENDODÓNTICO
ASISTIDA POR SISTEMAS DE NAVEGACIÓN ESTÁTICA, DINÁMICA Y
REALIDAD AUMENTADA EN CONDUCTOS RADICULARES
CALCIFICADOS**

Autora

Dra. D^a. María del Carmen García Franco

Directores

Dr. D. Álvaro Zubizarreta Macho

Dr. D. Javier Montero Martín

Salamanca, 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi padre y a mi tía, por su cariño y apoyo constante.

A mi novio, por ser mi compañero y mi mayor motivador.

A mi tutor de tesis, por su orientación, su paciencia y su fe en este proyecto.

Y en especial, a mi madre, por su amor incondicional, por creer siempre en mí y por su apoyo en cada paso que di. Su recuerdo me ha acompañado en cada página de esta tesis.

**FACULTAD DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIRUGÍA**

Alfonso X El Sabio, s/n.
Campus "Miguel de Unamuno"
37007 Salamanca

Tel.: (34) 923 29 45 00 EXT 1895
Fax: (34) 923 29 45 58

E-mail: cirugia@usal.es

D. Javier Montero Martín, Director del Departamento de Cirugía de la Universidad de Salamanca

CERTIFICA:

Que el Trabajo Doctoral titulado **“Preparación de cavidades de acceso endodóntico asistida por sistemas de navegación estática, dinámica y realidad aumentada en conductos radiculares calcificados”** del que es autora D^a María del Carmen García Franco, reúne los requisitos necesarios para su presentación y defensa ante el Tribunal Calificador para optar al **Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca**

Y para que así conste a los efectos oportunos, firman el presente Certificado en Salamanca a 1 de octubre de dos mil veinticinco.

Fdo.: Prof. Dr. Javier Montero Martín

INFORME DEL DIRECTOR DE LA TESIS DOCTORAL

Dr. D. Álvaro Zubizarreta Macho. Doctor en Odontología. Profesor Asociado de la Universidad de Salamanca.

Dr. D. Javier Montero Martín. Doctor en Odontología. Catedrático de Prótesis Dental de la Universidad de Salamanca.

Hacen constar que el trabajo de investigación realizado por Dra. D^a. María del Carmen García Franco, que lleva por título **“Preparación de cavidades de acceso endodóntico asistida por sistemas de navegación estática, dinámica y realidad aumentada en conductos radiculares calcificados”**, ha sido realizado bajo su dirección, siguiendo una rigurosa metodología, presentando unos resultados de interés y unas conclusiones derivadas de los anteriores, que hacen que dicho trabajo de investigación pueda ser defendido para optar al Grado de Doctor en Odontología.

Salamanca, 1 de Octubre de 2025.



Dr. D. Álvaro Zubizarreta Macho

Dr. D. Javier Montero Martín

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN.....	26
ANATOMÍA ENDODÓNTICA COMPLEJA.....	27
TÉCNICA NAVEGACIÓN ESTÁTICA (SN)	45
TÉCNICA DE NAVEGACIÓN DINÁMICA (DN)	53
TÉCNICA DE REALIDAD AUMENTADA (AR)	61
JUSTIFICACIÓN	70
HIPÓTESIS	73
OBJETIVOS.....	75
MATERIAL Y MÉTODOS	78
APROBACIÓN ÉTICA.....	79
CÁLCULO DEL TAMAÑO MUESTRAL	79
DISEÑO DEL ESTUDIO	79
PROCEDIMIENTOS PREOPERATORIOS	79
PREPARACIÓN DE CAVIDADES DE ACCESO ENDODÓNTICO	81
EVALUACIÓN POSTOPERATORIA DE LAS CAVIDADES DE ACCESO	85
ANÁLISIS ESTADÍSTICO	86
RESULTADOS	87
DESVIACIÓN CORONAL.....	88
DESVIACIÓN APICAL	88
DESVIACIÓN ANGULAR.....	89
DISCUSIÓN.....	92
CONCLUSIONES.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	113

Figura 1: (A) Imagen virtual del escáner CBCT, (B) dientes segmentados del escáner CBCT, (C) procedimiento de alineación entre los archivos DICOM del escáner CBCT y el archivo STL del escaneo intraoral, (D) planificación virtual de la cavidad de acceso endodóntico en los archivos digitales alineados, (E) archivo STL exportado para planificar la plantilla virtual y (F) plantilla virtual diseñada sobre el archivo digital STL.

Figura 2. (A) Diseño virtual de la plantilla para las cavidades de acceso endodóntico planificadas virtualmente utilizando navegación estática asistida por ordenador (SN), incorporando imágenes de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT). Las líneas rosas y azules representan la dirección de la fresa al ser insertada. (B) Planificación de la preparación de la cavidad de acceso con el software de planificación del tratamiento del sistema de navegación dinámica asistida por ordenador (DN) (cilindros amarillos y rojos). (C) Sistemas de conductos radiculares segmentados (en rojo). (D) Vista oclusal de la planificación de las cavidades de acceso (cilindros verdes). (E,F) Proceso de planificación en el software del dispositivo de realidad aumentada y (F) imagen obtenida con la AR con las cavidades de acceso virtuales (cilindros grises).

Figura 3. (A) Vista lateral y (B) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico guiadas planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema SN asistido por ordenador. (C) Vista lateral y (D) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema DN asistido por ordenador. (E) Vista lateral y (F) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico guiadas planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema AR. (G) Vista lateral y (H) vista oclusal de las cavidades de

acceso planificadas (cilindros azules) y las cavidades de acceso realizadas utilizando el método FH (cilindros verdes).

Figura 4. Diagrama de cajas de las desviaciones en el punto de entrada coronal (A), punto final apical (B) y desviaciones angulares (C) observadas en los grupos de estudio. Los valores medianos están representados por las líneas horizontales dentro de cada caja.

Tabla 1. Valores de desviación a nivel coronal (mm), apical (mm) y angular (°), y comparaciones entre los grupos en función de la metodología empleada.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- **3D:** Tridimensional
- **ANOVA:** Análisis de la Varianza (Analysis of Variance)
- **AR:** Realidad Aumentada (Augmented Reality)
- **CBCT:** Tomografía Computarizada de Haz Cónico (Cone-beam Computed Tomographic)
- **CONV:** Método Convencional (conventional method)
- **DE:** Dens Evaginatus
- **DE:** Desviación estándar (Standard Deviation)
- **DGE:** Endodoncia Guiada Dinámica (Dynamic Guided Endodontics)
- **DGT:** Terapia Guiada Digital (Digital Guided Therapy)
- **DI:** Dens Invaginatus
- **DICOM:** Digital Imaging and Communications in Medicine
- **DN:** Navegación Dinámica (Dynamic Navigation)
- **DOM:** Microscopio Operatorio Dental (Dental Operating Microscope)
- **FH:** Método Convencional a Mano Alzada (*Freehand*)
- **FOV:** Campo de Visión (Field of view)
- **HMD:** Dispositivo Montado en la Cabeza (Head-Mounted Device)
- **MB-2:** Segundo Conducto Mesiovestibular (Mesiobuccal 2nd canal)
- **OCP:** Obliteración del Conducto Pulpar
- **PCO:** Obliteración del Conducto Pulpar (Pulp Canal Obliteration)
- **SGE:** Endodoncia Guiada Estática (Static Guided Endodontics)
- **SN:** Navegación Estática (Static Navigation)
- **STL:** Estereolitografía (Stereolithography)

RELACIÓN DE MÉRITOS DERIVADOS DE LA TESIS DOCTORAL

Los resultados de la presente Tesis Doctoral han sido publicados en la siguiente revista de investigación: **García Franco C**, Riad Deglow E, Montero J, Abella Sans F, Nagendrababu V, Dummer PMH, Lobo Galindo AB, Zubizarreta-Macho Á. Endodontic access with different computer navigation systems in calcified root canals. J Am Dent Assoc. 2024 Dec;155(12):1043-1052. doi: 10.1016/j.adaj.2024.09.011. Epub 2024 Nov 7. PMID: 39520448., A continuación, se muestran los indicadores de la revista: Factor de impacto de la revista: 3.5. Área: DENTISTRY, ORAL SURGERY & MEDICINE. Cuartil: Q1. Posición en el área: 25/162.

Así mismo, los resultados han sido divulgados en una Comunicación Oral de Investigación presentada en el 44º Congreso Nacional de la Asociación Española de Endodoncia (AEDE): “Preparación de cavidades de acceso endodóntico asistidas por navegación estática, dinámica y realidad aumentada en sistemas de conductos radiculares calcificados”. Sevilla, 31 de octubre al 2 de noviembre de 2025.

Antecedentes: Se han desarrollado diversas técnicas de navegación asistida por ordenador para facilitar la preparación de cavidades de acceso endodóntico. El objetivo de este estudio fue analizar la precisión de las cavidades de acceso preparadas con ordenador estática asistida por ordenador (SN), navegación dinámica asistida por computadora (ND) y navegación basada en realidad aumentada (RA), en comparación con un método convencional de mano alzada (FH) en dientes mandibulares extraídos con sistemas de conductos radiculares calcificados.

Métodos: Cuarenta dientes mandibulares unirradiculares se dividieron en cuatro grupos y se obtuvieron tomografías computarizadas de haz cónico preoperatorias e impresiones digitales mediante un escáner intraoral. Posteriormente, se prepararon las cavidades de acceso utilizando SN (n = 10), ND (n = 10), RA (n = 10) o FH (n = 10), y se obtuvieron tomografías computarizadas de haz cónico postoperatorias de cada diente para evaluar la desviación de las cavidades de acceso entre las preparaciones preoperatorias planificadas virtualmente y las preparaciones postoperatorias reales. Se utilizó el análisis de varianza seguido de las pruebas post hoc de Tukey para identificar diferencias significativas en la desviación, considerándose significativos los valores de p inferiores a 0,05.

Resultados: Se encontraron desviaciones significativas de las cavidades de acceso coronalmente entre SN y DN ($P < 0,001$), SN y AR ($P < 0,001$), DN y FH ($P = 0,015$), y AR y FH ($P = 0,003$), y apicalmente entre SN y AR ($P = 0,003$) y AR y FH ($P = 0,006$). Se observaron diferencias significativas a nivel angular entre SN y DN ($P < 0,001$), SN y AR ($P < 0,001$), y SN y FH ($P = 0,013$).

Conclusiones: El AR se asoció con diferencias significativamente menores en la remoción de dentina y la alineación de la cavidad que los métodos SN, DN y FH.

Implicaciones prácticas: Las preparaciones de cavidades de acceso endodóntico utilizando tecnología AR fueron más precisas que las preparaciones utilizando otras técnicas y tienen el potencial de ser adoptadas en la práctica clínica cuando se obliteran los sistemas de canales.

Background: A range of computer-aided navigation techniques to aid endodontic access cavity preparation have been developed. The aim of this study was to analyze the accuracy of access cavities prepared with the aid of computer-aided static navigation (SN), computer-aided dynamic navigation (DN), and navigation based on augmented reality (AR) compared with a conventional freehand (FH) method in extracted mandibular teeth with calcified root canal systems.

Methods: Forty single-rooted mandibular teeth were divided into 4 groups, and preoperative cone-beam computed tomographic scans and digital impressions through an intraoral scan were obtained. Access cavities were then prepared using SN (n = 10), DN (n = 10), AR (n = 10), or FH (n = 10), and postoperative cone-beam computed tomographic scans of each tooth were obtained to evaluate deviation of the access cavities between the virtually planned preoperative preparations and the actual postoperative preparations. Analysis of variance followed by Tukey post hoc tests were used to identify significant differences in deviation, with P values below .05 being considered significant.

Results: Significant deviations of the access cavities were found coronally between SN and DN ($P < .001$), SN and AR ($P < .001$), DN and FH ($P = .015$), and AR and FH ($P = .003$) and apically between SN and AR ($P = .003$) and AR and FH ($P = .006$). There were significant differences at angular level between SN and DN ($P < .001$), SN and AR ($P < .001$), and SN and FH ($P = .013$).

Conclusions: AR was associated with significantly smaller differences in dentin removal and cavity alignment than the SN, DN, and FH methods.

Practical implications: Endodontic access cavity preparations using AR technology were more accurate than preparations using other techniques and have the potential to be adopted in clinical practice when canal systems are obliterated.

ANATOMÍA ENDODÓNTICA COMPLEJA

1. Clasificación de la anatomía dental

a) Sistemas de clasificación de conductos radiculares: Clasificación de Vertucci

La comprensión profunda de la morfología del sistema de conductos radiculares constituye un prerequisite fundamental para alcanzar resultados exitosos en la terapéutica endodóntica. La clasificación desarrollada por Vertucci et al. establece ocho configuraciones morfológicas fundamentales que pueden presentarse en cualquier raíz dental¹:

- **Tipo I (1-1):** Configuración caracterizada por un conducto único que transcurre desde la cámara pulpar hasta la región apical.
- **Tipo II (2-1):** Dos conductos independientes emergen desde la cámara pulpar y convergen en las proximidades del ápice formando un conducto único.
- **Tipo III (1-2-1):** Un conducto emerge de la cámara pulpar, experimenta una bifurcación intrarradicular y posteriormente confluye para emerger como conducto único.
- **Tipo IV (2-2):** Dos conductos independientes mantienen su trayectoria individual desde la cámara pulpar hasta la región apical.
- **Tipo V (1-2):** Un conducto abandona la cámara pulpar y se bifurca generando dos conductos con forámenes apicales independientes.
- **Tipo VI (2-1-2):** Dos conductos independientes emergen de la cámara pulpar, experimentan una confluencia en el tercio medio radicular y posteriormente se bifurcan nuevamente en las proximidades apicales.

- **Tipo VII (1-2-1-2):** Un conducto abandona la cámara pulpar, se bifurca y confluye en el cuerpo radicular, experimentando una nueva división en dos conductos independientes cerca del ápice.
- **Tipo VIII (3-3):** Tres conductos mantienen trayectorias independientes desde la cámara pulpar hasta la región apical¹

Esta clasificación ha demostrado su vigencia y aplicabilidad en investigaciones contemporáneas, incluyendo aquellas que emplean tecnología avanzada como la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT). Una investigación realizada mediante CBCT en población caucásica reveló que los segundos premolares maxilares exhibieron la totalidad de las ocho configuraciones de Vertucci, constituyendo el único grupo dental con tal diversidad morfológica ².

La literatura científica ha documentado configuraciones morfológicas adicionales a las descritas originalmente. Gulabivala et al. identificaron siete patrones suplementarios que incluyen: tres conductos convergiendo en uno o dos; dos conductos dividiéndose en tres; dos conductos que confluyen, se bifurcan y culminan como conducto único; cuatro conductos convergiendo en dos; cuatro conductos manteniendo trayectorias independientes desde los orificios hasta el ápice; y cinco conductos confluyendo en cuatro a nivel apical ².

b) Microanatomía del sistema de conductos radiculares

El espacio pulpar humano exhibe una complejidad morfológica considerable con múltiples configuraciones anatómicas. Además de los conductos principales, el sistema presenta una intrincada microanatomía que comprende:

Conductos accesorios y laterales: Estas estructuras comunicantes se proyectan desde el conducto principal o la cámara pulpar hacia la superficie radicular externa. Los conductos laterales representan conductos accesorios situados en los tercios coronario o medio radicular, típicamente con trayectoria horizontal desde el conducto principal. La distribución anatómica de estos conductos muestra una prevalencia del 73,5% en el tercio apical, 11,4% en el tercio medio y 6,3% en el tercio cervical radicular¹.

Conductos de furcación: Estas estructuras anatómicas se originan por el atrapamiento de elementos vasculares periodontales durante el proceso de fusión del diafragma que constituye el piso cameral. En molares mandibulares, estas comunicaciones presentan tres patrones morfológicos característicos: conducto único extendido desde la cámara pulpar hasta la región interradicular (13%); conducto lateral proyectado desde el tercio coronario de un conducto principal hacia la furcación (23%, con 80% originándose del conducto distal); o presentación combinada de conductos laterales y de furcación (10%)¹.

Deltas apicales: La región terminal del conducto radicular puede exhibir ramificaciones múltiples configurando un delta apical. Esta compleja red anatómica puede albergar microorganismos y comprometer la efectividad de los procedimientos de limpieza y desinfección¹.

Istmos: Los istmos constituyen comunicaciones estrechas con morfología laminar entre conductos que contienen tejido pulpar. Cualquier raíz con dos o más conductos presenta potencial para albergar istmos. La clasificación desarrollada por Hsu y Kim establece cinco categorías de istmos identificables en superficies radiculares biseladas:

- Tipo I: Dos o tres conductos sin comunicaciones identificables.
- Tipo II: Dos conductos con comunicación definida entre ellos.
- Tipo III: Tres conductos con comunicación establecida entre ellos.
- Tipo IV: Conductos proyectándose hacia el área ístmica.
- Tipo V: Comunicación completa o corredor continuo a través de toda la sección ¹.

La incidencia de istmos presenta variaciones significativas según el grupo dental: 15% en dientes anteriores, 16% en premolares maxilares a 1 mm de resección y 52% a 6 mm, 30% en premolares mandibulares a 2 mm, alcanzando hasta 80% en raíces mesiales de primeros molares mandibulares a 3-4 mm de resección ¹.

c) Variaciones anatómicas según grupos dentarios

La morfología del sistema de conductos radiculares presenta variaciones sustanciales entre los diferentes grupos dentarios:

Incisivos: En población caucásica, aproximadamente el 30% de los incisivos mandibulares exhiben dos conductos. Los incisivos centrales mandibulares presentan

configuración Tipo I en 72,3% de los casos, mientras que el Tipo III (1-2-1) se manifiesta en 24,2%. Los incisivos laterales mandibulares muestran patrones similares con 69,8% de configuración Tipo I y 23,1% de Tipo III ².

Caninos: Los caninos maxilares exhiben predominantemente configuración Tipo I (98,6%), mientras que los caninos mandibulares demuestran mayor heterogeneidad morfológica, con 90,2% presentando configuración Tipo I y diversas configuraciones adicionales en el porcentaje restante ².

Premolares: Los primeros premolares maxilares manifiestan principalmente configuración Tipo IV (2-2) en 68% de los casos, mientras que los segundos premolares maxilares exhiben la mayor diversidad morfológica entre todos los grupos dentarios, con solo 39,4% presentando configuración Tipo I ².

Molares: La raíz mesiovestibular de primeros molares maxilares con tres raíces independientes alberga dos conductos (MB1 y MB2) en 71,05% de los casos, prevalencia que disminuye a 43,56% en segundos molares maxilares. En molares mandibulares, la raíz mesial del primer molar típicamente contiene dos conductos (93,4%), con presencia de tres conductos en 5,5% de los casos. El segundo molar mandibular exhibe configuración Tipo II (2-1) en la raíz mesial en 63,9% de los casos ².

La incidencia de raíces supernumerarias demuestra variabilidad según el origen étnico poblacional. El radix entomolaris (raíz distolingual adicional) se identificó en 2,2%

de primeros molares mandibulares y 0,6% de segundos molares mandibulares en población caucásica ².

2. Dificultad en la localización de los conductos

a) Métodos tradicionales y sus limitaciones

La identificación y localización completa del sistema de conductos radiculares constituye uno de los desafíos técnicos más significativos en la práctica endodóntica contemporánea. Los métodos convencionales empleados incluyen:

Radiografías periapicales: Si bien constituyen el método de referencia para la detección radiográfica de patología periapical, presentan limitaciones significativas. Durante las fases iniciales de la enfermedad periapical, la destrucción ósea puede ser mínima o quedar enmascarada por estructuras anatómicas adyacentes, impidiendo su manifestación radiográfica ³. Las limitaciones inherentes de las radiografías periapicales convencionales incluyen:

- Representación bidimensional de estructuras tridimensionales complejas.
- Superposición de elementos anatómicos que ocultan detalles diagnósticos relevantes.
- Incapacidad para detectar conductos adicionales situados en el mismo plano radiográfico ³.

Una investigación comparativa entre sistemas de radiografía digital y CBCT para la detección del número de conductos reveló que los especialistas en endodoncia, incluso empleando múltiples angulaciones radiográficas, no lograron identificar al menos un conducto en 40% de los casos cuando se contrastaron con hallazgos de CBCT ³.

Exploración clínica: La investigación táctil del piso cameral mediante exploradores de punta aguda, la aplicación de colorantes y la prueba de efervescencia con hipoclorito de sodio constituyen recursos auxiliares importantes para la localización de orificios de entrada ¹. No obstante, estos métodos presentan una dependencia significativa de la habilidad y experiencia del operador.

Microscopio operatorio dental (DOM): La incorporación del microscopio operatorio dental ha proporcionado mejoras sustanciales en iluminación y visualización. Sin embargo, incluso con magnificación optimizada, la identificación de conductos calcificados o estrechos continúa representando un desafío técnico considerable ¹.

La literatura científica documenta de manera consistente que el microscopio operatorio mejora sustancialmente la capacidad clínica para identificar y manejar conductos radiculares. Los hallazgos de Baldassari-Cruz et al. evidencian un incremento notable en la detección de segundos conductos mesiovestibulares (MB-2), aumentando del 51% con visualización directa al 82% mediante el uso del DOM ¹. No obstante, el microscopio presenta limitaciones específicas, particularmente en casos con calcificaciones severas del sistema de conductos o anatomía compleja, donde la magnificación e iluminación pueden resultar insuficientes para la localización exitosa ⁴.

b) Consecuencias clínicas de conductos no tratados

El propósito fundamental del tratamiento endodóntico radica en la conformación y desinfección integral de todos los espacios pulpares, seguida de su obturación con materiales biocompatibles inertes. La persistencia de un conducto sin tratamiento puede constituir un factor determinante en el fracaso terapéutico ¹.

Un conducto puede permanecer sin tratamiento cuando el clínico no logra identificar su presencia. Resulta imperativo que los profesionales empleen todos los recursos disponibles para localizar y tratar la totalidad del sistema de conductos radiculares¹.

Las repercusiones clínicas derivadas de conductos no tratados comprenden:

- Persistencia del proceso infeccioso y desarrollo de patología periapical.
- Sintomatología dolorosa postoperatoria persistente.
- Necesidad de procedimientos de retratamiento o cirugía periapical.
- Riesgo incrementado de pérdida dental¹.

Esta problemática adquiere particular relevancia en dientes con complejidad anatómica como los primeros molares maxilares, donde la incidencia del segundo conducto mesiovestibular (MB-2) es elevada ².

3. Casos complejos en endodoncia

a) Obliteración del conducto pulpar (OCP)

La obliteración del conducto pulpar (OCP), denominada también metamorfosis calcificante, representa una secuela frecuente del trauma dental, desarrollándose predominantemente en dientes que han experimentado lesiones de concusión y subluxación ⁵. Esta condición se caracteriza por la deposición progresiva de tejido mineralizado dentro del espacio del conducto radicular, acompañada de una alteración cromática amarillenta de la corona clínica ⁵.

Etiología: aunque todavía no se entiende completamente cómo ocurre exactamente el cierre/bloqueo del conducto, la evidencia sugiere una relación causal con el compromiso del aporte neurovascular pulpar durante el evento traumático ⁵. La literatura reporta que entre 4% y 24% de los dientes traumatizados desarrollan diversos grados de obliteración pulpar ⁵.

La incidencia de OCP correlaciona directamente con la severidad de la lesión por luxación y el estadio de desarrollo radicular ⁵. La obliteración pulpar posterior a lesiones por concusión se manifestó en 3% de dientes con desarrollo radicular incompleto y 7% en dientes con formación radicular completa ⁵.

Adicionalmente al trauma, diversos factores etiológicos pueden desencadenar OCP, incluyendo procesos cariosos, envejecimiento fisiológico, abrasión dental, procedimientos de recubrimiento pulpar y terapia ortodóntica, todos los cuales pueden inducir la deposición de tejido mineralizado en el espacio del conducto ⁶.

Fisiopatología: El proceso de calcificación del espacio del conducto progresa en dirección corono-apical, comprometiendo inicialmente la cámara pulpar y extendiéndose posteriormente hacia el conducto radicular ⁴. La calcificación cameral resulta en la alteración del tono cromático, pérdida de translucidez y apariencia amarillenta característica de la corona dental ⁵.

Las investigaciones histopatológicas diseñadas para evaluar el estado pulpar en dientes con obliteración no han evidenciado signos inflamatorios indicativos de procesos patológicos ⁵. Lundberg y Cvek analizaron histológicamente las pulpas de 20 incisivos superiores permanentes con espacios pulpares reducidos, documentando ausencia de microorganismos en todas las muestras y observando respuesta inflamatoria moderada únicamente en una pulpa ⁵.

La obliteración pulpar puede manifestarse como total (OPCT) o parcial (OPCP). En OPCT, tanto la cámara pulpar como el conducto radicular resultan radiográficamente imperceptibles, mientras que en OPCP, la cámara o el conducto presentan dimensiones reducidas o no son identificables radiográficamente ⁴.

La necrosis pulpar representa la complicación terminal de la OCP, aunque constituye un hallazgo relativamente infrecuente ⁵. La incidencia de necrosis pulpar en dientes permanentes con OCP oscila entre 1% y 16% tras períodos de observación promedio de 3,4 a 16 años ⁵. Sin embargo, una investigación reciente que incluyó 276 dientes con OCP documentó una prevalencia de necrosis pulpar del 27,2% ⁵.

b) Otras configuraciones anatómicas complejas

Conductos en forma de C: La configuración anatómica de conducto en forma de C fue documentada inicialmente por Cooke y Cox. Aunque la mayoría de estos conductos se presentan en segundos molares mandibulares, también se han reportado en primeros molares mandibulares, primeros y segundos molares maxilares, y primeros premolares mandibulares ¹.

Los molares mandibulares con esta configuración reciben su denominación por la morfología transversal característica de su raíz y sistema de conductos. En contraste con múltiples orificios discretos, la cámara pulpar del molar en forma de C presenta un orificio único con morfología laminar describiendo un arco de 180° o superior ¹.

Conducto mesiovestibular (MB2): La raíz mesiovestibular del primer molar maxilar ha sido objeto de investigación más extensa que cualquier otra raíz dental. Típicamente alberga dos conductos, aunque se ha documentado la presencia de un tercer conducto ¹. En población caucásica, la prevalencia de dos conductos en la raíz

mesiovestibular del primer molar maxilar alcanza 71,05%, mientras que esta prevalencia disminuye a 43,56% en segundos molares maxilares ².

El conducto MB2 se localiza típicamente en posición mesial o directamente sobre una línea imaginaria entre los orificios MB1 y palatino, dentro de 3,5 mm en dirección palatina ¹. Su negociación presenta dificultades técnicas considerables debido a la prominencia dentinaria que cubre su orificio, la inclinación mesiovestibular de su entrada en el piso pulpar y su trayectoria, que frecuentemente presenta una o dos curvaturas pronunciadas en la porción coronaria radicular ¹.

Dens invaginatus (DI): El DI constituye una anomalía anatómica con prevalencia considerable, alcanzando 9% en la población adulta evaluada mediante CBCT ⁶. Una investigación mediante CBCT en población china documentó una prevalencia de DI del 8,47% y una prevalencia por diente del 0,494% ⁶.

La morfología del DI presenta variaciones considerables, pudiendo manifestarse como normal, cónica, en forma de tapón, forma de cúspide en garra y con surcos. La clasificación más ampliamente aceptada fue propuesta por Oehlers en 1957: Tipo I, la invaginación no se extiende más allá de la unión amelocementaria. Tipo II, la invaginación penetra la raíz, pero permanece confinada como saco ciego. Tipo III, la invaginación se extiende más allá de la unión amelocementaria comunicándose directamente con el ligamento periodontal lateralmente (Tipo IIIa) o en el foramen apical (Tipo IIIb) ⁶.

La planificación terapéutica del DI requiere consideración de su anatomía individual, vitalidad pulpar, estado periapical, condición periodontal y origen del tracto sinusal ⁶. El plegamiento del esmalte dentro de la dentina genera un sistema de conductos irregular, complicando significativamente la ejecución del tratamiento endodóntico convencional ⁶.

4. Limitaciones del microscopio dental

El microscopio operatorio dental (DOM) ha proporcionado avances excepcionales en la identificación y manejo de la anatomía del sistema de conductos radiculares ¹. Sin embargo, presenta limitaciones significativas que deben considerarse:

- A pesar del empleo del DOM, determinados conductos, particularmente en casos con calcificación severa o complejidad anatómica, pueden permanecer indetectables ⁴.

- Incluso con magnificación optimizada, ciertos casos pueden requerir eliminación excesiva de estructura dental para visualizar y acceder a conductos calcificados, comprometiendo potencialmente la integridad estructural del elemento dental ⁴.

- La magnificación no resuelve intrínsecamente el desafío que representa la dentina calcificada obstruyendo el acceso a los conductos ⁵.

Múltiples investigaciones han evaluado la efectividad del DOM en la localización de conductos. Baldassari-Cruz et al. documentaron un incremento en la detección de

segundos conductos mesiovestibulares (MB-2) del 51% con visualización directa al 82% empleando DOM. Coelho de Carvalho y Zuolo concluyeron que el DOM facilitó la localización de conductos mediante la magnificación e iluminación de surcos en el piso pulpar y la diferenciación cromática entre la dentina del piso y las paredes. El DOM permitió identificar 8% más conductos en molares mandibulares ¹.

Sin embargo, Görduysus et al. determinaron que el DOM no mejoró significativamente la capacidad de localización de conductos, aunque facilitó su negociación. Schwarze et al. identificaron 41,3% de conductos MB-2 empleando lupas de magnificación y 93,7% con DOM. Buhrley et al., por su parte, determinaron que las lupas dentales y el DOM demostraron eficacia equivalente para localizar conductos MB-2 en molares maxilares ¹.

Stropko determinó que se alcanzó mayor incidencia en la localización de conductos MB-2 "conforme aumentaba la experiencia clínica, se programaba tiempo suficiente para el tratamiento, se empleaba rutinariamente el DOM y se utilizaban instrumentos específicos adaptados para microendodoncia" ¹.

A pesar de estas ventajas documentadas, en casos de obliteración pulpar severa, incluso empleando DOM, la localización de conductos puede resultar imposible o requerir eliminación excesiva de estructura dental. Esta limitación ha impulsado el desarrollo de técnicas más avanzadas como la endodoncia guiada, que integra CBCT y guías impresas tridimensionalmente para localizar con precisión conductos calcificados

5. Tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) en endodoncia

a) Introducción del CBCT en endodoncia

La tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) representa una modalidad relativamente reciente para la visualización individual de elementos dentales o la dentición en relación con los tejidos esqueléticos circundantes, permitiendo la generación de imágenes tridimensionales del área de interés ³. En contraste con los métodos radiográficos convencionales, que reproducen la anatomía tridimensional como imagen bidimensional, el CBCT constituye un método de imagen tridimensional que ofrece la capacidad de visualizar elementos dentales individuales desde cualquier perspectiva, en lugar de vistas predeterminadas ³.

El CBCT supera numerosas limitaciones inherentes a la radiografía periapical ³. Los equipos de CBCT ofrecen un amplio espectro de tamaños de campo de visión (FOV) ². Teóricamente, todos pueden emplearse para aplicaciones endodónticas, aunque se recomienda utilizar el menor FOV posible cuando sea factible ².

Resulta fundamental que la totalidad del FOV, no exclusivamente la región de interés, sea interpretada y documentada ³. Debe solicitarse un informe radiológico de un radiólogo especializado cuando sea apropiado ³.

b) Detección de conductos adicionales y calcificados

El CBCT permite la detección de radiolucencias periapicales antes de su manifestación en radiografías convencionales ³. Lofthag-Hansen et al. documentaron que se detectaron 38% más lesiones periapicales en raíces de dientes con sospecha de enfermedad periapical mediante CBCT comparado con radiografías convencionales ³.

En una investigación clínica, Patel et al. encontraron que la prevalencia de lesiones periapicales en raíces de dientes con enfermedad endodóntica primaria detectadas con radiografías periapicales y CBCT fue 20% y 48%, respectivamente ³.

La capacidad del CBCT para identificar con precisión la morfología del conducto radicular también demuestra superioridad sobre la radiografía convencional. Matherne et al. realizaron una investigación ex vivo comparando sistemas de radiografía digital con CBCT para detectar el número de conductos radiculares en 72 incisivos mandibulares, primeros premolares y primeros molares maxilares extraídos. Los resultados revelaron que, con radiografías digitales, independientemente del sistema empleado, los endodoncistas no identificaron al menos un conducto radicular en 40% de los dientes comparado con CBCT, a pesar de emplear múltiples angulaciones radiográficas ³.

Un estudio taiwanés evaluó la prevalencia de raíces distolinguales en primeros molares mandibulares mediante radiografías convencionales y CBCT, documentando prevalencias de conductos distolinguales del 21% y 33%, respectivamente ³.

Blattner et al. evaluaron molares maxilares primeros y segundos extraídos para determinar la prevalencia de segundos conductos mesiovestibulares (MB-2). Posterior al escaneo, los dientes fueron seccionados axialmente determinándose el número real de conductos presentes. Se documentó una correlación del 80% entre los hallazgos de CBCT y los resultados del seccionamiento dental. La concordancia intraexaminador con CBCT alcanzó 90%, indicando un nivel excelente de confiabilidad ³.

c) CBCT como base para técnicas de navegación guiada

La terapia guiada digital (DGT) se ha propuesto como una técnica contemporánea asistida por computadora para el tratamiento de patologías endodónticas en las últimas décadas ⁶. El concepto de DGT para patologías endodónticas se categoriza en endodoncia guiada estática (SGE), que requiere una plantilla meticulosamente diseñada, y endodoncia guiada dinámica (DGE), que emplea un sistema de seguimiento por triangulación óptica ⁶.

Basándose en imágenes de CBCT superpuestas con o sin datos de escaneo oral, se elabora una plantilla virtual mediante software especializado y posteriormente se materializa mediante impresión tridimensional (3D) para SGE, mientras que el sistema guía la trayectoria de perforación con navegación en tiempo real en DGE ⁶.

La literatura ha documentado que la DGT resuelve satisfactoriamente diversos casos endodónticos desafiantes, incluyendo dientes con obliteración pulpar, dientes con anomalías anatómicas, dientes que requieren retratamiento, dientes posteriores que necesitan microcirugía endodóntica y autotrasplante dental ⁶. Los reportes de casos e investigaciones fundamentales demuestran que la DGT constituye un enfoque preciso, eficiente en tiempo y mínimamente invasivo en contraste con el método convencional a mano alzada ⁶.

El CBCT constituye un prerequisite esencial para cualquier procedimiento de endodoncia guiada, proporcionando la información tridimensional necesaria para planificar la trayectoria de acceso ⁶. Previo al tratamiento con endodoncia guiada, generalmente se realiza un CBCT con campo de visión específico para clarificar la visualización detallada de la raíz, conducto pulpar, hueso y elementos neurovasculares adyacentes ⁶. Un CBCT de FOV pequeño (<80 mm) resulta generalmente adecuado para el diagnóstico y manejo de patologías endodónticas ⁶.

La aplicación de DGT está indicada en diversas situaciones clínicas complejas, incluyendo:

Dientes con conductos obliterados: La DGT resulta particularmente beneficiosa en dientes con obliteración del conducto pulpar (PCO), donde la localización convencional del conducto podría resultar en pérdida excesiva de estructura dental o perforación ⁶.

Dientes con anomalías anatómicas: Se han documentado múltiples casos sobre la aplicación de SGE en dientes con anomalías anatómicas como Dens Invaginatus (DI) y Dens Evaginatus (DE) ⁶.

Dientes que requieren retratamiento: La DGT puede facilitar la remoción de postes de manera rápida y segura, minimizando simultáneamente la pérdida de estructura dental remanente en dientes anteriores y posteriores ⁶.

Microcirugía endodóntica: La DGT ha demostrado beneficios en la localización exacta y resección del extremo radicular de manera mínimamente invasiva ⁶.

TÉCNICA NAVEGACIÓN ESTÁTICA (SN)

1. Primer uso documentado en el campo de la endodoncia con su desarrollo posterior y su evolución

La técnica de navegación estática (SN) en endodoncia, conocida también como endodoncia guiada, fue introducida en 2016 como un enfoque innovador para abordar los desafíos presentados por dientes con obliteración del conducto pulpar (PCO) y patología apical ⁷. Este método pionero fue desarrollado inicialmente por Krastl et al. y Zehnder et al., quienes de manera independiente pero simultánea publicaron sus investigaciones

sobre el empleo de guías tridimensionales para la localización de conductos radiculares calcificados ^{8,7}.

La investigación inicial de Zehnder et al. (2016) empleó una metodología para integrar exploraciones de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) con escaneos superficiales intraorales, generando guías tridimensionales precisas que facilitarían la preparación de cavidades de acceso endodóntico y la localización de conductos radiculares ⁸. Este estudio ex vivo analizó la precisión del método utilizando 60 dientes extraídos monoradiculares (incisivos, caninos y premolares) colocados en seis modelos maxilares, alcanzando una tasa de éxito del 100% en la localización de todos los conductos radiculares tras la preparación de la cavidad de acceso mediante esta técnica ⁸.

Simultáneamente, Krastl et al. (2016) publicaron el primer caso clínico de endodoncia guiada en un incisivo central superior con PCO y patología apical ⁷. Este reporte pionero demostró la aplicabilidad clínica del concepto, empleando CBCT y escaneo intraoral (iTero) para diseñar una plantilla que guiara la preparación de la cavidad de acceso hasta la porción permeable del conducto radicular ⁷.

La evolución técnica continuó en 2017 con la introducción de la "microendodoncia guiada", desarrollada por Connert et al., como variante específica para dientes con raíces de menor diámetro, como los incisivos mandibulares. Esta innovación implicó la miniaturización del instrumental empleado, con fresas de 0.85 mm de diámetro y longitud de trabajo de 20 mm, permitiendo preparar con precisión cavidades de acceso extendidas apicalmente en dientes anteriores con conductos estrechos ⁹

Con el progreso en la aceptación clínica, la aplicación de la técnica se expandió desde dientes anteriores hacia sectores posteriores. En 2021, Torres et al. introdujeron un sistema de guía sin camisa para abordar premolares superiores con PCO, ofreciendo una solución innovadora para superar limitaciones espaciales al trabajar en sectores posteriores ¹⁰. Este diseño eliminaba el requerimiento de una camisa metálica para guiar la fresa, empleando alternativamente rieles guía posicionados contra las superficies dentales para orientar el cabezal del instrumento rotatorio ¹⁰.

En años recientes, se ha observado un crecimiento exponencial en las publicaciones científicas relacionadas con endodoncia guiada. Según Wei et al. (2023), más de 150 artículos han sido publicados en PubMed bajo términos como "guided endodontics", "microguided endodontics", "static guided endodontics" y denominaciones similares ⁶. Esta evolución ha conducido a la categorización de la terapia guiada digital para patologías endodónticas en dos enfoques principales: endodoncia guiada estática (SGE), que requiere una plantilla meticulosamente diseñada, y endodoncia guiada dinámica (DGE), que emplea un sistema de seguimiento por triangulación óptica ⁶.

2. Aplicaciones específicas de la navegación estática en conductos calcificados

La aplicación principal de la navegación estática (SN) se centra en el tratamiento de dientes con obliteración del conducto pulpar (PCO) que requieren intervención endodóntica. La PCO puede resultar de diversos factores, incluyendo traumatismos dentales, procesos cariosos, envejecimiento fisiológico, desgaste dental, recubrimiento

pulpar y tratamiento ortodóncico, que conducen a la deposición de tejido mineralizado en el espacio del conducto radicular ⁶. El tratamiento endodóntico de estos casos está indicado únicamente cuando existen manifestaciones clínicas sintomáticas o lesiones periapicales radiográficas, considerando que más del 25% de estos dientes pueden desarrollar necrosis pulpar con signos radiográficos de patología periapical ⁶.

La endodoncia guiada estática ha demostrado particular utilidad en dientes anteriores con raíces rectas y evidencia clara de periodontitis apical, permitiendo que la plantilla diseñada guíe eficientemente la fresa específica para penetrar a través de la porción obliterada del conducto radicular y obtener acceso a la región apical ⁶. En estos casos, cuando la mayoría de los conductos son visibles en el tercio apical radicular en el CBCT, la técnica permite una preparación de acceso precisa y mínimamente invasiva ⁶.

Una investigación de Buchgreitz et al. (2019) en 50 pacientes con PCO demostró la aplicabilidad clínica de esta técnica. El estudio documentó que se logró precisión aceptable en todos los casos, permitiendo la localización y negociación del conducto radicular y la finalización exitosa del tratamiento ¹¹. Los resultados evidenciaron que la precisión del trayecto de la fresa fue significativamente superior en dientes mandibulares comparados con dientes maxilares, y cuando se había realizado un intento previo de acceso y negociación del conducto ¹¹.

Otra aplicación relevante de la navegación estática en conductos calcificados se observa en dientes con anomalías anatómicas. Entre estas, el dens invaginatus (DI) representa una anomalía con prevalencia considerable, alcanzando 9% en la población

adulta evaluada mediante CBCT ⁶. La morfología del DI presenta variaciones, pudiendo manifestarse como normal, cónica, en forma de tapón, forma de cúspide en garra y con surcos ⁶. La aplicación de endodoncia guiada en estos casos permite un acceso preciso a la cavidad de invaginación mientras se preserva la vitalidad del conducto radicular principal ⁶.

De manera similar, el dens evaginatus (DE), anomalía anatómica caracterizada por una elevación sólida suplementaria en alguna porción de la superficie coronaria, puede beneficiarse de esta técnica cuando se requiere un acceso mínimamente invasivo ⁶. También se ha documentado la aplicación de navegación estática en dientes con displasia dentinaria (DD), anomalía anatómica infrecuente que causa aposición acelerada de dentina y espacios pulpares estrechos ⁶.

La técnica también ha encontrado aplicación en casos que requieren retratamiento endodóntico. En dientes donde se han colocado postes de fibra con núcleo de composite, la técnica guiada puede facilitar la eliminación de estos postes de manera expedita y segura, minimizando la pérdida de estructura dental remanente ⁶. Investigaciones como la de Perez et al. reportaron una tasa de éxito del 87.5% empleando SN para acceder a través de postes de fibra intrarradiculares ¹².

La navegación estática también puede emplearse en casos donde un tratamiento previo ha resultado en desviación iatrogénica o perforación en los conductos radiculares. Una guía tridimensional apropiadamente diseñada ha demostrado factibilidad para retornar al conducto original y alcanzar permeabilidad durante el retratamiento en

determinados casos ⁶, aunque debe evaluarse cuidadosamente si la relocalización del conducto justifica el procedimiento, considerando que la navegación guiada puede comprometer adicionalmente la estructura dental ⁶.

3. Ventajas y limitaciones de la técnica estática

Ventajas

La ventaja principal de la navegación estática radica en su elevada precisión para localizar conductos calcificados. Un metaanálisis reciente ha documentado que la SN presenta una tasa de éxito del 95.48% (IC 95% = 90.2-98.7%) en la localización de conductos calcificados ¹². Esta técnica permite una preparación de cavidad de acceso precisa y mínimamente invasiva, preservando estructura dental crítica ^{13,12}.

La técnica reduce significativamente la pérdida de sustancia dental durante la preparación de la cavidad de acceso. Connert et al. (2019) compararon la pérdida de sustancia dental entre endodoncia guiada y acceso convencional, documentando valores de 9.8 mm³ y 49.9 mm³ respectivamente ¹³. Esta conservación de estructura dental resulta fundamental para mantener la resistencia a la fractura del diente tratado ¹³.

Otra ventaja significativa es la reducción del tiempo clínico. La duración del tratamiento empleando SN fue de 11.3 minutos comparado con 21.8 minutos para la técnica convencional en un estudio ex vivo ¹³. Esta reducción del tiempo operatorio disminuye la fatiga tanto del operador como del paciente ¹².

La técnica ha demostrado independencia respecto a la experiencia del operador. Connert et al. (2019) documentaron que el éxito del procedimiento no se ve influenciado por la experiencia del operador, lo que hace esta técnica particularmente valiosa para clínicos menos experimentados ¹³. Los resultados evidenciaron que operadores con distintos niveles de experiencia (especialista en endodoncia, dentista general con 3 años de experiencia y recién graduado) lograron tasas de éxito comparables utilizando la técnica guiada ¹³.

Adicionalmente, la navegación estática proporciona resultados predecibles en casos complejos donde el acceso convencional podría resultar en perforaciones o eliminación excesiva de tejido dental ¹⁴. La técnica permite identificar con precisión la entrada del conducto radicular, incluso en casos de obliteración severa ¹⁵.

Limitaciones

A pesar de sus múltiples ventajas, la navegación estática presenta limitaciones importantes que deben considerarse. Una limitación principal es su aplicabilidad restringida en dientes posteriores debido a restricciones espaciales. La posición más posterior del diente, la distancia interoclusal reducida y la anatomía compleja de los conductos dificultan la implementación de esta técnica en molares ^{10,6}.

La técnica generalmente requiere realizar un CBCT preoperatorio, lo que implica una dosis adicional de radiación para el paciente. Esta consideración debe evaluarse cuidadosamente en el contexto del principio ALARA (tan bajo como sea razonablemente alcanzable) ^{16, 6}.

El costo representa otra limitación significativa. La fabricación de plantillas guía y la necesidad de software especializado incrementan el costo del tratamiento, lo que puede constituir una barrera para algunos pacientes ^{16, 6}. El análisis costo-beneficio debe evaluarse cuidadosamente en cada situación clínica ¹⁶.

La preparación de la plantilla guía requiere tiempo adicional para la planificación virtual y fabricación, lo que puede retrasar el tratamiento inmediato ¹⁴. Aunque el procedimiento clínico puede ser más rápido y ágil, el tiempo total requerido para planificación, fabricación y ejecución del tratamiento puede ser considerable ¹⁴.

La navegación estática presenta limitaciones anatómicas importantes. No resulta adecuada para conductos radiculares con curvaturas pronunciadas o anatomía compleja, dado que la fresa empleada sigue un trayecto recto ^{16, 14}. Esta característica restringe su uso principalmente a dientes con conductos rectos ¹⁶.

Existe riesgo documentado de fracaso y complicaciones. Fonseca Tavares et al. (2022) reportaron un caso de perforación radicular durante el empleo de endodoncia guiada en un incisivo central superior, requiriendo intervención microquirúrgica para su

resolución ¹⁷. Las causas potenciales de fallo incluyen la falta de estabilidad completa de la guía y las inexactitudes generadas por el software de fusión de malla realizado manualmente ¹⁷

Otra limitación relevante es la visualización reducida durante el procedimiento. La plantilla y la camisa pueden obstruir la visión directa del campo operatorio, dificultando la irrigación adecuada y la visualización de la cámara pulpar y conductos radiculares ⁶. Esta situación puede comprometer la desinfección adecuada del sistema de conductos ⁶.

Las restauraciones metálicas existentes pueden generar artefactos en las imágenes CBCT, comprometiendo la precisión del diseño de la plantilla ⁶. En determinados casos, pueden considerarse marcadores fiduciales para superar esta limitación ⁶.

El diseño de las guías también puede presentar limitaciones específicas. Torres et al. (2021) propusieron un sistema de guía sin camisa para superar algunas de estas limitaciones, permitiendo mejor visualización e irrigación durante la perforación, aunque este enfoque puede carecer de la estabilidad proporcionada por las guías convencionales con camisa ¹⁰.

TÉCNICA DE NAVEGACIÓN DINÁMICA (DN)

1. Primer uso documentado en el campo de la endodoncia con su desarrollo posterior y su evolución

La técnica de navegación dinámica (DN) constituye un sistema guiado por computadora, desarrollado originalmente para la colocación de implantes dentales, que ha sido adaptado posteriormente para procedimientos endodónticos ¹⁸. El primer uso documentado de navegación dinámica en el campo endodóntico fue publicado en 2019 por Chong et al., quienes investigaron la aplicación de esta tecnología para la preparación de cavidades de acceso guiadas y localización de conductos radiculares, demostrando el potencial del sistema para su implementación en la práctica clínica endodóntica ¹⁸. Este estudio piloto de laboratorio empleó el sistema Navident (ClaroNav) en modelos dentales fabricados a partir de dientes humanos extraídos, mostrando resultados prometedores en términos de precisión para la preparación conservadora de cavidades de acceso ¹⁸.

La navegación dinámica forma parte del concepto integral de endodoncia guiada, que comprende tanto técnicas estáticas como dinámicas para la localización y tratamiento de conductos radiculares ¹⁹. Este sistema funciona de manera análoga a un sistema de posicionamiento global (GPS), proporcionando retroalimentación en tiempo real durante los procedimientos endodónticos ²⁰. La técnica emplea un sistema de seguimiento óptico controlado por una interfaz informática dedicada para proporcionar orientación en tiempo real durante el procedimiento quirúrgico ²¹.

El desarrollo de la navegación dinámica en endodoncia se benefició de los avances tecnológicos en sistemas de implantes, incluyendo Robodent, Navident, X-Guide e Image-Guided Implantology ¹⁹. La técnica ha experimentado una evolución significativa

desde su introducción inicial, con mejoras sustanciales en precisión y usabilidad de los sistemas ²⁰. En 2021, X-Nav Technologies recibió autorización de la Administración de Alimentos y Medicamentos de Estados Unidos (FDA) para ampliar el uso de su sistema de navegación quirúrgica dinámica X-Guide para asistir a los profesionales en la realización de procedimientos endodónticos mínimamente invasivos ²².

Entre los sistemas de navegación dinámica empleados en endodoncia se encuentran: Navident (ClaroNav), X-Guide System (X-Nav Technologies), ImplaNavi (BresMedical) y DENACAM (mininavident AG) ^{19,23}. La evolución de estos sistemas ha permitido superar limitaciones iniciales, como la necesidad de crear plantillas físicas, permitiendo un enfoque más flexible y adaptable para el tratamiento endodóntico ²⁰.

Un avance tecnológico significativo fue el desarrollo del sistema de registro de trazado de segunda generación, que supera las desventajas del enfoque de marcadores fiduciales, eliminando la necesidad de férulas ²⁴. Esta técnica de registro de trazado permite la recalibración y retrazado en tiempo real ante inexactitudes, mejorando la viabilidad clínica y reduciendo la exposición a radiación ^{24,23}.

2. Aplicaciones específicas de la navegación dinámica en conductos calcificados

La navegación dinámica ha demostrado particular utilidad en casos clínicamente desafiantes, como el tratamiento de dientes con obliteración de canales pulpares (PCO) ²¹. La PCO, conocida también como metamorfosis calcificante, calcificación del canal pulpar o calcificación distrófica, está asociada con la deposición de tejido mineralizado

dentro del espacio del conducto radicular, dificultando significativamente el acceso y localización del conducto ²².

El tratamiento de conductos calcificados constituye uno de los campos principales de aplicación de la navegación dinámica, permitiendo una preparación precisa y conservadora de la cavidad de acceso, reduciendo el riesgo de complicaciones iatrogénicas como perforaciones, alteración de la geometría del conducto y pérdida excesiva de tejido dentario ²². Diversos estudios han documentado el empleo de navegación dinámica para localización de canales calcificados, mostrando tasas de éxito significativamente superiores comparadas con la técnica manual convencional ^{19, 25, 23}.

La aplicación de navegación dinámica en conductos calcificados sigue un protocolo específico que comprende las siguientes etapas ^{21, 22}:

- 1) Escaneo CBCT preoperatorio: Empleando un dispositivo de registro en forma de U con múltiples marcadores fiduciales radiopacos adaptados a la dentición.
- 2) Planificación virtual del trayecto de perforación: Basada en datos del CBCT, determinando punto de entrada, ángulo, trayectoria y profundidad necesarios para acceder al conducto.
- 3) Calibración y registro: Emparejamiento de dispositivos de referencia, pieza de mano y rastreador según especificaciones del fabricante.
- 4) Navegación en tiempo real: Guiando la preparación de la cavidad de acceso con retroalimentación visual sobre posición, ángulo y profundidad de la fresa.

Wu et al. (2022) documentaron dos casos clínicos de tratamiento de PCO empleando el sistema de navegación dinámica, logrando localizar exitosamente los conductos calcificados en ambos casos ²². En uno de los casos trataron un incisivo central maxilar derecho presentando calcificación del conducto radicular hasta el tercio apical, mientras que en el segundo caso trataron varios dientes anteriores mandibulares con cámaras pulpaes completamente calcificadas ²².

Otra aplicación específica documentada es la remoción de postes de fibra en procedimientos de retratamiento endodóntico utilizando navegación dinámica, como demostraron Bardales-Alcocer et al. en un caso clínico de retratamiento de un incisivo lateral superior izquierdo que soportaba un puente de zirconio ¹⁹.

La navegación dinámica también ha mostrado utilidad en la localización y tratamiento de conductos adicionales, como segundos conductos mesiovestibulares en molares superiores o segundos conductos linguales en caninos mandibulares, así como en casos con cálculos pulpaes ²⁶.

3. Ventajas y limitaciones de la técnica dinámica

Ventajas

La navegación dinámica ofrece múltiples ventajas sobre las técnicas convencionales y los sistemas de guías estáticas en el tratamiento endodóntico ^{20, 27}:

1. Visualización en tiempo real: Permite observar la posición y angulación de la preparación durante la secuencia de perforación, permitiendo ajustes en tiempo real ²⁷.
2. Flexibilidad intraoperatoria: Permite modificaciones en el plan de tratamiento durante el procedimiento, característica no disponible con guías estáticas ^{23, 28}.
3. Eliminación de problemas asociados con guías estáticas:
 - a. No requiere espacio interoclusal adicional ²⁰
 - b. Mejor visibilidad del campo operatorio ^{20, 27}
 - c. Enfriamiento adecuado durante la preparación ^{20, 27}
 - d. Facilita la colocación del dique de goma y el lavado de la cavidad ²¹
4. Tratamiento en sesión única: El proceso completo, incluyendo imágenes CBCT, planificación preoperatoria y preparación del conducto radicular, puede completarse en una sola visita clínica ²⁸.

5. Conservación de estructura dental: Los resultados demuestran consistentemente que la navegación dinámica produce menor pérdida de sustancia dental comparada con la técnica manual ^{24, 25, 29, 26}.
6. Independencia de la experiencia del operador: Tras entrenamiento adecuado, la navegación dinámica puede proporcionar resultados similares entre operadores con diferentes niveles de experiencia ^{23, 28}.
7. Aplicabilidad en casos complejos: Especialmente valiosa en casos con variaciones anatómicas, cámaras pulpares con cálculos pulpares o conductos calcificados difíciles de localizar ^{20, 21}.
8. Menor riesgo de complicaciones: Reduce significativamente el riesgo de perforaciones y otros errores iatrogénicos ^{25, 22}.

Limitaciones

A pesar de sus ventajas, la navegación dinámica presenta ciertas limitaciones que requieren consideración ^{20, 21, 28}:

1. Curva de aprendizaje pronunciada: Requiere entrenamiento significativo para desarrollar las habilidades necesarias de coordinación mano-ojo mientras se observa el monitor en lugar del paciente ²⁸.
2. Inversión inicial en equipamiento: El costo del sistema de navegación dinámica y los requisitos de software asociados pueden ser considerables ^{20, 23}.
3. Complejidad del procedimiento: Los procedimientos de calibración y registro deben realizarse con precisión para evitar errores acumulativos ^{21, 23}.
4. Factores que afectan la precisión:
 - a. Calidad de la imagen CBCT: movimientos del paciente durante la adquisición del CBCT y restauraciones coronales radiopacas pueden comprometer la calidad de imagen ²¹
 - b. Estabilidad: la estabilidad del dispositivo de registro, dispositivo de referencia y el diente resultan cruciales ²¹
 - c. Errores dependientes del operador: la coordinación mano-ojo del operador puede introducir imprecisiones ^{21, 23}
5. Tiempo de procedimiento más prolongado: Varios estudios han documentado que la navegación dinámica puede requerir más tiempo que la técnica manual, especialmente durante las etapas iniciales de la curva de aprendizaje ^{29, 26}.

6. Limitaciones visuales: Dificultad para mantener la visibilidad del campo operatorio y la pantalla del sistema simultáneamente ²².
7. Errores sistemáticos: Pueden producirse debido a pérdida de estabilidad del rastreador de mandíbula durante el tratamiento, movimiento del dispositivo o mapeo inadecuado de puntos de referencia ²³.

Yang et al. (2024) documentaron específicamente algunas limitaciones y fallos en la localización de conductos calcificados utilizando navegación dinámica, incluyendo desviaciones significativas en la dirección de perforación y alteraciones en la geometría del conducto ²¹. Estas limitaciones requieren una evaluación preoperatoria minuciosa del paciente y el diente afectado ²¹.

TÉCNICA DE REALIDAD AUMENTADA (AR)

1. Primer uso documentado en el campo de la endodoncia con su desarrollo posterior y su evolución

El desarrollo de la realidad aumentada (AR) en el campo endodóntico tiene sus orígenes en los primeros intentos de utilizar sistemas de visión por computadora para el reconocimiento automatizado de estructuras anatómicas. Los pasos iniciales hacia esta tecnología se establecieron con el desarrollo de software capaz de detectar automáticamente los orificios de los conductos radiculares en secuencias de video durante el tratamiento endodóntico ³⁰. En 2009, Brüllmann y colaboradores desarrollaron un

algoritmo de clasificación por distancia mínima que explotaba las propiedades ópticas de los orificios de los conductos radiculares, siendo estas las regiones más profundas y oscuras en el piso de la cámara pulpar. Este sistema proporcionó una sensibilidad de detección del 90,1% con solo 11,9% de detecciones falso-positivas ³⁰.

La evolución continuó en 2011 cuando se evaluó la posibilidad de utilizar cámaras intraorales como herramientas de diagnóstico asistido por computadora para la localización de orificios de conductos radiculares. El estudio demostró que el software alcanzaba una sensibilidad elevada del 95,7% para la detección automática en tiempo real, superando incluso la capacidad de detección de un estudiante predoctoral (84,7%) y aproximándose a la de un observador experimentado (90,6%) ³¹.

El concepto formal de realidad aumentada en endodoncia fue introducido por Bruellmann y colaboradores en 2013, quienes propusieron un sistema de video optimizado para aumentar la realidad en endodoncia. Desarrollaron software utilizando C++, Qt y la biblioteca de procesamiento de imágenes OpenCV para detectar dientes en imágenes de video, restringir la segmentación de los orificios de los conductos radiculares mediante un algoritmo y determinar la ubicación de los orificios utilizando segmentación basada en distancia euclidiana (distancia en línea recta entre dos puntos). Este sistema pionero empleaba tecnología AR para superponer información aumentada sobre las imágenes del campo operatorio en tiempo real, permitiendo a los profesionales visualizar la ubicación exacta de los conductos radiculares durante el procedimiento. ³².

En años subsecuentes, se produjo un avance significativo con la integración de dispositivos de montaje en cabeza (HMD) para AR. Un hito importante fue la introducción del dispositivo HoloLens (Microsoft Corporation) en endodoncia. En 2023, Martinho y colaboradores integraron HoloLens 2 con un sistema de navegación dinámico tridimensional (3D-DNS) para procedimientos de osteotomía y resección apical, permitiendo al cirujano superponer contenido AR de alta definición del sistema de navegación cerca del sitio quirúrgico ³³. Este enfoque resolvió una limitación crítica de sistemas anteriores, permitiendo al operador mantener el enfoque en el campo quirúrgico sin necesidad de desviar la mirada hacia una pantalla de navegación ³³.

En 2024, Martinho y colaboradores ampliaron la aplicación del HoloLens 2 a procedimientos de remoción de postes en molares maxilares. El sistema permitía al cirujano visualizar tanto el software de planificación como la navegación en tiempo real superpuestos en el sitio quirúrgico, mejorando significativamente la precisión del procedimiento ³⁴.

2. Aplicaciones específicas de la realidad aumentada en conductos calcificados

Una de las aplicaciones más prometedoras de la AR en endodoncia es el tratamiento de dientes con conductos calcificados. La obliteración del conducto pulpar (PCO) ocurre comúnmente tras traumatismos dentales, tratamiento ortodóntico, respuesta a lesiones pulpares, caries, procedimientos restauradores, abfracciones, o en dientes de pacientes de edad avanzada. Estos casos presentan desafíos significativos para el

tratamiento endodóntico convencional debido a la dificultad para localizar y negociar los conductos obliterados.³⁵

La AR ofrece una solución para estos casos complejos proporcionando orientación visual en tiempo real durante la preparación de la cavidad de acceso. Los sistemas AR permiten superponer la trayectoria planificada de perforación sobre la imagen real del diente, facilitando una preparación de acceso más precisa y conservadora²⁶. Esta capacidad resulta particularmente valiosa en casos de PCO donde la pérdida excesiva de estructura dental y el riesgo de perforación constituyen preocupaciones importantes⁶.

Para el tratamiento de conductos calcificados, el proceso típicamente inicia con una exploración CBCT preoperatoria para visualizar la anatomía dental y planificar la trayectoria de acceso³⁵. Estos datos se combinan con un escaneo de superficie intraoral para crear un modelo virtual preciso. Utilizando dispositivos AR como HoloLens 2, los endodoncistas pueden visualizar esta información superpuesta directamente sobre el diente durante el procedimiento, permitiéndoles mantener la trayectoria planificada y alcanzar la porción visible del conducto calcificado con precisión⁶.

Los sistemas AR han demostrado particular utilidad en casos donde los conductos están obliterados hasta el tercio medio o apical radicular. El cirujano puede visualizar la ruta planificada de acceso y ajustar en tiempo real su enfoque, resultando en menor pérdida de sustancia dental y reducción del riesgo de perforación⁶.

Adicionalmente, la AR ha sido aplicada exitosamente en dientes con anomalías anatómicas como dens invaginatus, dens evaginatus y displasia dentinaria, donde la anatomía compleja del conducto hace extremadamente difícil la localización convencional ⁶. En estos casos, la AR permite crear múltiples cavidades de acceso conservadoras y precisas para la localización de conductos radiculares individuales ³⁶.

3. Ventajas y limitaciones de la realidad aumentada

Ventajas

La ventaja principal de los sistemas AR en endodoncia radica en la capacidad de combinar la visualización del campo operatorio real con información virtual superpuesta, permitiendo mayor precisión en la localización de conductos radiculares ³². Esta característica resulta particularmente valiosa en casos de anatomía compleja o conductos calcificados donde la navegación convencional podría resultar en errores iatrogénicos.

La AR proporciona visualización mejorada del campo quirúrgico sin necesidad de desviar la mirada hacia una pantalla separada, mejorando la coordinación mano-ojo del operador ³³. Algunos sistemas AR, como HoloLens 2, ofrecen funciones adicionales como comandos de voz e interacción basada en gestos, permitiendo a los cirujanos interactuar con los datos de imagen directamente durante las operaciones mientras mantienen un entorno estéril ³³.

En comparación con técnicas de navegación estática que utilizan plantillas quirúrgicas, los sistemas AR ofrecen varias ventajas, incluyendo reducción de costos y tiempo al eliminar la necesidad de procedimientos de impresión y laboratorio ³⁶. Además, proporcionan visión directa del campo quirúrgico y permiten el uso de fresas estándar, resultando óptimo en casos de apertura bucal reducida ³⁶.

La AR también permite ajustes intraoperatorios en tiempo real, a diferencia de los sistemas estáticos que son rígidos una vez fabricados ³³. Esta característica resulta especialmente importante en endodoncia, donde pueden surgir desafíos inesperados durante el procedimiento.

En términos de resultados clínicos, la AR ha demostrado mejorar la precisión de la preparación de cavidades de acceso endodóntico, con desviaciones angulares y horizontales significativamente menores comparadas con la técnica convencional a mano alzada ³⁶. Esto resulta en menor pérdida de sustancia dental y reducción del riesgo de complicaciones como perforaciones o conductos no localizados ⁶.

Adicionalmente, la AR puede implementarse para superar la fobia dental, comúnmente experimentada por pacientes pediátricos ³⁷.

Limitaciones

A pesar de sus numerosas ventajas, los sistemas AR en endodoncia presentan limitaciones importantes. Una limitación principal es la necesidad de exploración CBCT preoperatoria, incrementando la exposición a radiación y costos para el paciente ^{26,6}. Aunque el CBCT resulta esencial para la planificación virtual, representa una carga de radiación adicional que debe justificarse clínicamente.

Otra limitación es la curva de aprendizaje asociada con el uso de sistemas AR ²⁶. Los operadores requieren entrenamiento específico para adaptarse a la visualización e interacción con elementos virtuales superpuestos al campo real, pudiendo verse afectada la eficiencia inicialmente mientras se adquiere esta habilidad. Un estudio indicó que se requirieron 20 intentos de práctica para que los operadores se calibraran adecuadamente con el sistema AR HoloLens 2 ³³.

Los sistemas AR actuales también presentan limitaciones técnicas en términos de precisión de registro y alineación. Incluso con tecnología avanzada, pueden ocurrir pequeñas discrepancias entre la planificación virtual y la realidad, potencialmente afectando los resultados en procedimientos de alta precisión ³⁶.

El costo del equipo constituye otra limitación significativa. Los dispositivos AR como HoloLens 2 son relativamente costosos, pudiendo limitar su adopción generalizada en la práctica clínica ³⁴. Además, existe la posibilidad de síntomas de cibermareo en algunos usuarios al utilizar dispositivos de realidad aumentada, aunque se ha reportado que estos síntomas son menos frecuentes en AR que en realidad virtual ³⁴.

En términos de aplicabilidad clínica, la técnica AR presenta limitaciones en dientes posteriores debido a dificultades de acceso y visualización ²⁶. También está limitada a conductos rectos o porciones rectas de conductos curvos, dado que la fresa utilizada es recta y no deformable ³⁵.

La obliteración del conducto pulpar (OCP) representa uno de los desafíos clínicos más significativos en la endodoncia contemporánea. Esta condición que puede ser resultado de un trauma, caries o envejecimiento fisiológico, está caracterizada por la aposición de tejido duro en el espacio del conducto radicular y provoca que la preparación de una cavidad de acceso endodóntico adecuada y la localización de los orificios o de la cámara pulpar resulten a menudo extremadamente difíciles, incrementando de manera notable el riesgo de errores iatrogénicos.

El abordaje convencional a mano alzada (FH), incluso la ayuda de magnificación como el microscopio operatorio, presenta limitaciones inherentes que pueden derivar en perforaciones radiculares, debilitamiento de la estructura dental remanente por eliminación excesiva de tejido y, en última instancia, el fracaso del tratamiento.

La necesidad de superar estas dificultades ha impulsado la integración de tecnologías de imagen tridimensional, como la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), y el desarrollo de sistemas de navegación asistida por ordenador. En este contexto, la endodoncia guiada ha surgido como una alternativa predecible y mínimamente invasiva. Técnicas como la navegación estática (SN), que emplea guías quirúrgicas impresas en 3D, y la navegación dinámica (DN), que ofrece un seguimiento del instrumental en tiempo real, han demostrado mejorar la precisión en comparación con el método convencional.

Más recientemente, la realidad aumentada (AR) se ha introducido como una tecnología disruptiva con el potencial de optimizar aún más estos procedimientos. Al superponer

información virtual tridimensional directamente sobre el campo operatorio, la AR ofrece una guía visual intuitiva que podría reducir las desviaciones y preservar al máximo la estructura dental sana.

A pesar de que la literatura científica respalda los beneficios de las técnicas guiadas de forma individual, existe una brecha en el conocimiento en cuanto a la evaluación comparativa directa de su precisión. No existen estudios experimentales estandarizados que analicen simultáneamente la eficacia de la navegación estática, la navegación dinámica y la realidad aumentada, contrastándolas entre sí y frente al método convencional.

Por lo tanto, la justificación de mi trabajo se basa en la realización de la presente investigación para determinar, de manera objetiva y cuantitativa, cuál de estas técnicas ofrece la mayor precisión en la preparación de cavidades de acceso endodóntico en dientes con sistemas de conductos radiculares calcificados, aportando así evidencia científica robusta para guiar la toma de decisiones clínicas en estos casos de alta complejidad.

HIPÓTESIS NULA (H_0)

No existen diferencias estadísticamente significativas en la precisión de las cavidades de acceso endodóntico —medida en términos de desviación coronal, apical y angular— entre las preparaciones realizadas con las técnicas de navegación estática (SN), navegación dinámica (DN), realidad aumentada (AR) y el método convencional a mano alzada (FH/CONV).

HIPÓTESIS ALTERNATIVA (H_1)

Existen diferencias estadísticamente significativas en la precisión de las cavidades de acceso endodóntico —medidas en términos de desviación coronal, apical y angular— entre los diferentes grupos de tratamiento (SN), (DN) y (AR) en comparación con el método convencional a mano alzada (FH/CONV).

GENERAL

Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar y comparar la precisión de las cavidades de acceso endodóntico realizadas en dientes con conductos radiculares calcificados. Para ello, se comparan tres tecnologías de navegación asistida por ordenador —navegación estática (SN), navegación dinámica (DN) y realidad aumentada (AR)— con el método convencional a mano alzada (FH). La precisión se evaluará comparando la planificación preoperatoria ideal con la preparación real postoperatoria de la cavidad.

ESPECÍFICOS

Para cumplir con el objetivo principal, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar y comparar las desviaciones horizontales (medidas en milímetros) encontradas en el punto de entrada coronal de la cavidad de acceso entre los grupos SN, DN, AR y FH.
- Analizar y comparar las desviaciones horizontales (medidas en milímetros) encontradas en el punto final apical de la cavidad de acceso entre los cuatro grupos experimentales.
- Analizar y comparar las desviaciones angulares (medidas en grados) de las cavidades de acceso preparadas entre los grupos SN, DN, AR y FH.

- Determinar si la Realidad Aumentada (AR) posee mayor precisión y obtiene diferencias significativamente menores en la eliminación de dentina y en la alineación de la cavidad en comparación con los métodos de Navegación Estática (SN), Navegación Dinámica (DN) y el método Convencional (FH/CONV).

APROBACIÓN ÉTICA

El protocolo del estudio fue aprobado por el Comité de Ética de la Universidad Alfonso X el Sabio (Proceso nº 02/2019). Todos los pacientes otorgaron su consentimiento informado para que sus dientes fueran utilizados con fines de investigación.

CÁLCULO DEL TAMAÑO MUESTRAL

De acuerdo con un estudio previo ³⁸, se determinó que un total de 40 muestras (10 por grupo) proporcionaría una potencia estadística del 95% para detectar diferencias significativas en las desviaciones coronales, apicales y angulares entre los cuatro grupos experimentales (tamaño del efecto: 0,70; alfa = 5%).

DISEÑO DEL ESTUDIO

Se seleccionaron cuarenta dientes humanos unirradiculares —incisivos mandibulares (n = 4), caninos (n = 2) y premolares (n = 4)— que presentaban un único conducto radicular clasificado como configuración Tipo I de Vertucci ^{39,40}

Los dientes, extraídos por motivos periodontales, no presentaban caries, reabsorciones, restauraciones ni fracturas, y mostraban dimensiones coronarias clínicas similares.

Como criterio de inclusión, los sistemas de conductos debían estar parcialmente obliterados conforme a la clasificación de Reis et al ⁴³: las cámaras pulpares no eran visibles en las radiografías periapicales, y los conductos eran visibles pero notablemente estrechos.

PROCEDIMIENTOS PREOPERATORIOS

Los cuarenta dientes fueron asignados aleatoriamente a cuatro grupos experimentales mediante un software de aleatorización (Epidat 4.1, Galicia, España).

Posteriormente, los 10 dientes de cada grupo se montaron en una mandíbula artificial fabricada en resina epoxi (EpoxiCure®, Buehler, IL, EE. UU.) formando un arco mandibular.

Los modelos artificiales y los dientes se digitalizaron mediante un escáner intraoral 3D (True Definition, 3M ESPE™, Saint Paul, MN, EE. UU.) y se realizó una tomografía CBCT (WhiteFox, Acteón Médico-Dental Ibérica S.A.U., Mérignac, Francia) para planificar digitalmente la preparación ideal de la cavidad de acceso siguiendo las recomendaciones de Krapež et al.⁴¹

Los parámetros de exposición fueron: 105,0 kVp, 8,0 mA, 7,20 s, campo de visión de 15 × 13 mm y tamaño de voxel de 100 μm.

Los archivos DICOM obtenidos se importaron al software de planificación tridimensional NemoScan® (Nemotec, Madrid, España). Toda la planificación preoperatoria fue realizada por un único operador con más de 10 años de experiencia en planificación 3D.

El software proporcionó la información necesaria para diseñar la cavidad de acceso ideal de cada diente, definiendo las posiciones de los casquillos de titanio en la técnica de navegación estática (SN), el proceso de fresado en las técnicas de navegación dinámica (DN) y realidad aumentada (AR), así como las referencias de eje y profundidad para el método convencional a mano alzada (FH) (Figura 1).

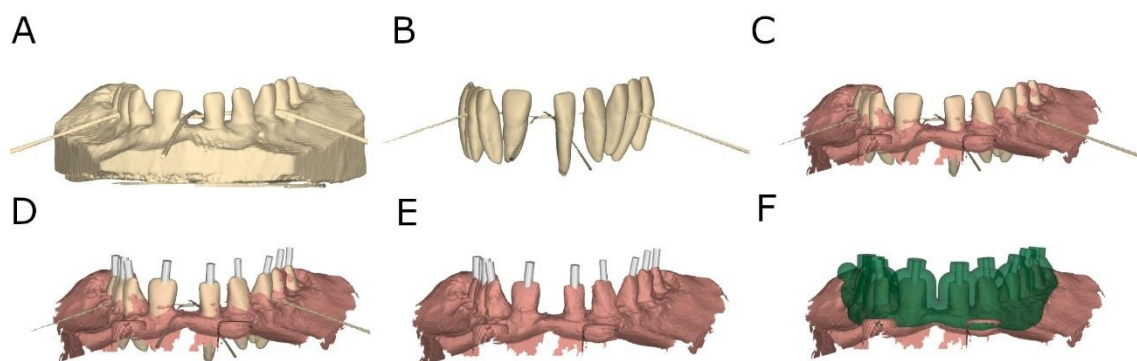


Figura 1. (A) Imagen virtual del escáner CBCT, (B) dientes segmentados del escáner CBCT, (C) procedimiento de alineación entre los archivos DICOM del escáner CBCT y el archivo STL del escaneo intraoral, (D) planificación virtual de la cavidad de acceso endodóntico en los archivos digitales alineados, (E) archivo STL exportado para planificar la plantilla virtual y (F) plantilla virtual diseñada sobre el archivo digital STL.

PREPARACIÓN DE CAVIDADES DE ACCESO ENDODÓNTICO

Con el fin de estandarizar el procedimiento, un único operador con más de 10 años de experiencia en endodoncia realizó todas las cavidades de acceso con lupas de aumento 3,8× (Akura, Madrid, España), excepto las muestras correspondientes al grupo AR.

Todos los modelos fueron montados en una cabeza fantoma y, en todos los grupos, se accedió a la cámara pulpar con una fresa de 1,2 mm de diámetro (Ref. 882 314 012, Komet Medical, Lemgo, Alemania).

En todos los casos, la localización del conducto radicular se verificó introduciendo una lima tipo K nº 15 y confirmando su posición mediante radiografía periapical.

Grupo A: Navegación estática asistida por ordenador (SN)

La planificación virtual de las cavidades de acceso se realizó tras alinear los archivos DICOM de la CBCT con el archivo STL procedente del escaneado intraoral en el software NemoScan®. Se diseñaron cilindros virtuales de 1,2 mm de diámetro desde el borde incisal hasta el orificio del conducto radicular calcificado.

Posteriormente, se diseñó una plantilla quirúrgica en base a dichas trayectorias y se imprimió en 3D (ProJet® 6000, 3D Systems®, Rock Hill, SC, EE. UU.), insertando casquillos de titanio de 5,0 mm de longitud y 1,3 mm de diámetro interno (Ref. M.27.24.D130L5; Steco, Hamburgo, Alemania) (Figura 2A).

Las cavidades se prepararon colocando la plantilla sobre los dientes y fresando hasta que la fresa contactó con el tope mecánico del casquillo.

Grupo B: Navegación dinámica asistida por ordenador (DN)

Se colocó una plantilla personalizada (NaviStent, Navident, ClaroNav) con marcadores fiduciales sobre las coronas clínicas de los dientes del grupo DN y se realizó una CBCT preoperatoria.

Los archivos DICOM y STL se importaron al software Navident® (ClaroNav, Toronto, Canadá), planificándose trayectorias rectas de acceso hasta la cámara pulpar.

Un sistema de cámaras estereoscópicas de seguimiento óptico registró los marcadores del instrumental y guió en tiempo real el ángulo, la trayectoria y la profundidad del fresado (Figura 2B).

Grupo C: Realidad aumentada (AR)

Los archivos digitales se importaron al software NemoScan® para diseñar virtualmente las cavidades de acceso. Los modelos 3D resultantes se cargaron en unas gafas de realidad aumentada (HoloLens2, Microsoft, Redmond, WA, EE. UU.), que permitieron la visualización holográfica en tiempo real.

Un único operador realizó las preparaciones utilizando las gafas AR, que respondían a comandos de voz y gestos manuales mediante la aplicación DentalGlasses (versión beta).

El sistema generó un mapeo espacial digital del entorno físico mediante cámaras visibles, sensores de profundidad y giroscopios, logrando la superposición precisa del modelo holográfico sobre el modelo físico de resina epoxi (Figuras 2C-F).

Figura 2. (A) Diseño virtual de la plantilla para las cavidades de acceso endodóntico planificadas virtualmente utilizando navegación estática asistida por ordenador (SN), incorporando imágenes de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT). Las líneas rosas y azules representan la dirección de la fresa al ser insertada. (B) Planificación de la preparación de la cavidad de acceso con el software de planificación del tratamiento del sistema de navegación dinámica asistida por ordenador (DN) (cilindros amarillos y rojos). (C) Sistemas de conductos radiculares segmentados (en rojo). (D) Vista oclusal de la planificación de las cavidades de acceso (cilindros verdes). (E,F) Proceso de planificación en el software del dispositivo de realidad aumentada y (F) imagen obtenida con la AR con las cavidades de acceso virtuales (cilindros grises).

Grupo D: Método convencional a mano alzada (FH)

El operador pudo visualizar la CBCT en un ordenador portátil durante la preparación para orientar la angulación y profundidad de la cavidad. Las preparaciones se realizaron bajo microscopio operatorio (OPMI pico, ZEISS, Jena, Alemania) con pieza de mano contraángulo y refrigeración por agua.

EVALUACIÓN POSTOPERATORIA DE LAS CAVIDADES DE ACCESO

Tras la preparación, se obtuvieron nuevas tomografías CBCT con los mismos parámetros de exposición preoperatorios.

Un evaluador independiente, ajeno a las preparaciones, realizó el análisis de alineación entre las cavidades planificadas y las obtenidas postoperatoriamente en el software NemoScan®.

Los archivos STL preoperatorios se superpusieron a las CBCT postoperatorias, determinando las desviaciones coronal, apical y angular conforme al método descrito por Zehnder et al ⁸.

Las desviaciones se midieron con una precisión de 0,01 mm (en niveles coronal y apical) y 0,01° (en desviación angular) (Figura 3).

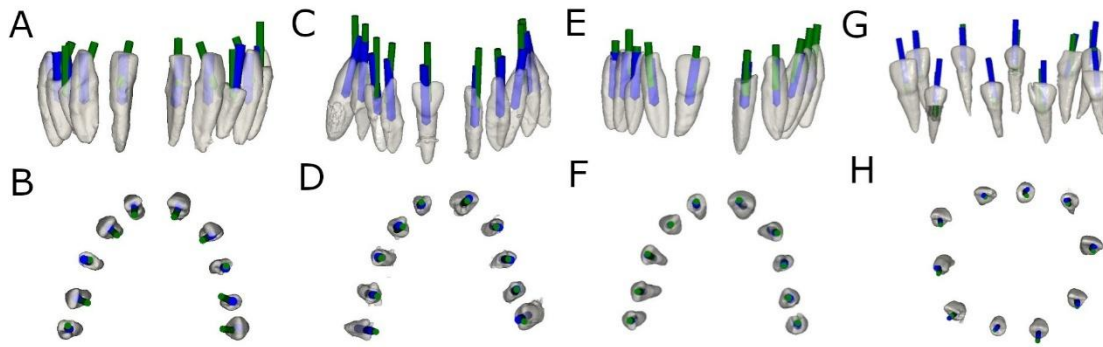


Figura 3. (A) Vista lateral y (B) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico guiadas planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema SN asistido por ordenador. (C) Vista lateral y (D) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema DN asistido por ordenador. (E) Vista lateral y (F) vista oclusal de las cavidades de acceso endodóntico guiadas planificadas (cilindros azules) y realizadas (cilindros verdes) mediante el sistema AR. (G) Vista lateral y (H) vista oclusal de las cavidades de acceso planificadas (cilindros azules) y las cavidades de acceso realizadas utilizando el método FH (cilindros verdes).

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los valores de desviación coronal, apical y angular se compararon entre los grupos experimentales mediante ANOVA.

Se comprobó la normalidad de los datos con la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianzas con la corrección de Welch.

Las comparaciones múltiples se ajustaron mediante la corrección de Tukey.

Se consideraron diferencias estadísticamente significativas aquellas con un valor de $p < 0,05$.

Todas las cavidades de acceso preparadas utilizando sistemas asistidos por ordenador identificaron los conductos radiculares. Sin embargo, las cavidades de acceso preparadas con el método FH resultaron en una perforación radicular y en dos conductos radiculares no localizados.

DESVIACIÓN CORONAL

Las estadísticas descriptivas para la desviación coronal (mm), la desviación apical (mm) y la desviación angular (°) se presentan en la Tabla 1. Se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p < 0,001$).

Para las desviaciones en el punto de entrada coronal, se encontraron diferencias significativas entre SN y DN (diferencia media 2,98; $p < 0,001$), SN y AR (diferencia media 3,31; $p < 0,001$), DN y FH (diferencia media 1,70; $p = 0,0152$) y AR y FH (diferencia media 2,03; $p = 0,0029$).

Sin embargo, no hubo diferencias significativas entre SN y FH (diferencia media 1,28; $p = 0,0961$) y DN y AR (diferencia media 0,33; $p = 0,9258$).

Las mayores desviaciones en el punto de entrada coronal se observaron en el plano vestibular/palatino (Tabla 1 y Figura 4A).

DESVIACIÓN APICAL

Para las desviaciones apicales, se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p < 0,001$). En las comparaciones por pares, se observaron diferencias significativas entre SN y AR (diferencia media 1,62; $p = 0,0033$) y AR y FH (diferencia media 1,52; $p = 0,0063$).

No se encontraron diferencias significativas entre los grupos SN y DN (diferencia media 1,16; $p = 0,0509$), SN y FH (diferencia media 0,10; $p = 0,9956$), DN y AR (diferencia media 0,46; $p = 0,7128$) y DN y FH (diferencia media 1,06; $p = 0,0850$).

Las mayores desviaciones en el punto final apical se observaron en el plano vestibular/palatino (Tabla 1 y Figura 4B).

DESVIACIÓN ANGULAR

Se produjeron diferencias significativas en la desviación angular entre los grupos (ANOVA de Welch, $p = 0,014$). En las comparaciones por pares, se encontraron diferencias entre las desviaciones angulares de los grupos SN y DN (diferencia media 11,4; $p = 0,0007$), SN y AR (diferencia media 11,8; $p = 0,0005$) y SN y FH (diferencia media 8,68; $p = 0,0128$); sin embargo, no hubo diferencias significativas entre los grupos DN y AR (diferencia media 0,32; $p = 0,9994$), DN y FH (diferencia media 2,76; $p = 0,7312$) y AR y FH (diferencia media 3,08; $p = 0,6596$).

Las mayores desviaciones a nivel angular se observaron en el plano vestibular/palatino (Tabla 1 y Figura 4C).

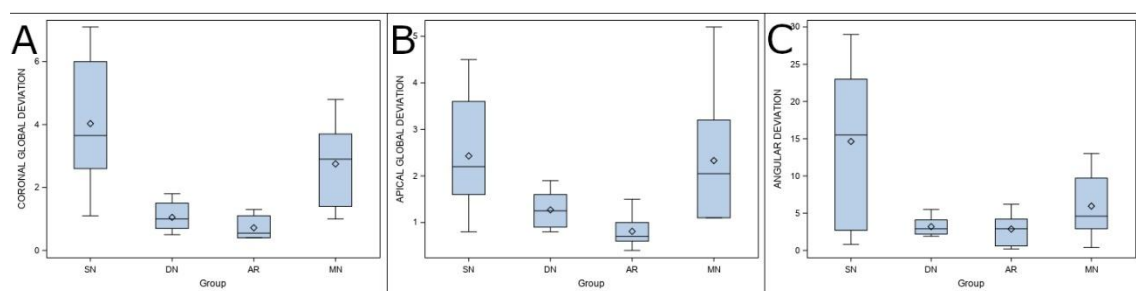


Figura 4. Diagrama de cajas de las desviaciones en el punto de entrada coronal (A), punto final apical (B) y desviaciones angulares (C) observadas en los grupos de estudio. Los valores medianos están representados por las líneas horizontales dentro de cada caja.

Tabla 1. Valores de desviación a nivel coronal (mm), apical (mm) y angular (°), y comparaciones entre los grupos en función de la metodología empleada.

	Grupo	n	Media	DS	Mínimo	Máximo
Coronal	SN	10	4.03 ^a	1.93	1.10	7.10
	DN	10	1.05 ^b	0.45	0.50	1.80
	AR	10	0.72 ^b	0.36	0.40	1.30
	CONV	10	2.75 ^a	1.28	1.00	4.80
Apical	SN	10	2.43 ^a	1.23	0.80	4.50
	DN	10	1.27 ^a	0.37	0.80	1.90
	AR	10	0.81 ^b	0.36	0.40	1.50
	CONV	10	2.33 ^a	1.40	1.10	5.20
Angular	SN	10	14.63 ^a	10.92	0.80	29.00
	DN	10	3.19 ^b	1.16	1.90	5.50
	AR	10	2.87 ^b	2.09	0.20	6.20
	CONV	10	5.95 ^c	4.21	0.40	13.00

SN, sistema de navegación estática; DN, sistema de navegación dinámica; AR, dispositivo de realidad aumentada; CONV, método convencional a mano alzada. a,b,c Diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p < 0,05$).

La obliteración del conducto pulpar constituye uno de los desafíos más significativos en la práctica endodóntica contemporánea, con una incidencia que oscila entre el 4% y el 24% en dientes traumatizados ⁴² y puede presentarse como consecuencia de diversos factores etiológicos, incluyendo lesiones cariosas, restauraciones coronales extensas, traumatismos dentales y tratamientos ortodónticos ²⁵. Esta condición, caracterizada por la deposición de tejido duro dentro del espacio del conducto radicular, compromete significativamente la localización y negociación de los conductos durante el tratamiento endodóntico convencional, aumentando el riesgo de complicaciones iatrogénicas como perforaciones, transportación del conducto y pérdida excesiva de estructura dental ⁸

En este contexto, la obliteración y calcificación de los sistemas de conductos radiculares plantea un dilema clínico fundamental: ¿cómo se puede garantizar un acceso endodóntico preciso si las referencias anatómicas tradicionales del diente están comprometidas? Esta pregunta ha sido objeto de múltiples investigaciones ^{43, 44, 45} que convergen en una misma conclusión: el abordaje convencional presenta limitaciones significativas que se traducen en riesgos para la integridad y estructura dental remanente. Esta problemática puede traducirse en complicaciones potenciales, las cuales pueden ir desde el debilitamiento estructural hasta las perforaciones iatrogénicas ^{44, 45}, y para solventarlo se ha favorecido el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras.

El desarrollo de estas tecnologías responde a la necesidad clínica de superar las limitaciones inherentes a los métodos convencionales, donde la localización de conductos

calcificados depende principalmente de la experiencia del operador, el conocimiento anatómico y la interpretación de imágenes bidimensionales ⁴⁶. La integración de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT) con sistemas de navegación asistida por ordenador ha permitido la transición hacia un enfoque más predecible y conservador, donde la planificación virtual tridimensional guía con precisión la preparación de la cavidad de acceso ⁴⁷. Esta evolución tecnológica no solo mejora la precisión del procedimiento, sino que también democratiza el acceso a tratamientos de alta complejidad, permitiendo que clínicos con diferentes niveles de experiencia logren resultados comparables ⁴⁸.

En este contexto, han emergido tres tecnologías innovadoras que prometen revolucionar el abordaje de estos casos complejos: la navegación estática (SN), la navegación dinámica (DN) y la realidad aumentada (AR). El presente estudio evaluó comparativamente la precisión de estas tres técnicas junto con el método manual convencional (FH) en la preparación de cavidades de acceso endodóntico en 40 dientes mandibulares unirradiculares con conductos calcificados. Nuestros hallazgos demostraron que la tecnología de realidad aumentada proporcionó la mayor precisión, con desviaciones coronales de 0.72 mm, apicales de 0.81 mm y angulares de 2.87°, significativamente menores que las otras técnicas evaluadas. Este estudio representa, la primera comparación directa de estas cuatro modalidades en condiciones experimentales estandarizadas.

Nuestro estudio se posicionó en la intersección entre la práctica tradicional y la innovación tecnológica. Los resultados no solo validaron la superioridad técnica de los

sistemas asistidos, sino que también proporcionaron un cambio a la hora de poder abordar el tratamiento de estos casos complejos, rechazando así nuestra hipótesis nula.

La validación de esta superioridad técnica se ve reforzada por la información proveniente de meta-análisis y revisiones sistemáticas recientes. Banka et al. realizaron un meta-análisis donde evaluaron comparativamente el tratamiento de la calcificación o metamorfosis cálcica e incluyeron datos cuantitativos de tres estudios con un total de 192 muestras (96 con navegación guiada, 96 con técnicas convencionales) ⁴². Los resultados, expresados como diferencia de medias estandarizada (SMD), favorecieron significativamente el tratamiento endodóntico guiado con un SMD de -0.97 (-1.83–0.10), indicando que es 0.97 veces más efectivo en promedio que las técnicas convencionales ($P = 0.03$) ⁴². No obstante, este análisis reportó una alta heterogeneidad ($I^2 = 83\%$) utilizando un modelo de efectos aleatorios ⁴². Otro meta-análisis llevada a cabo por Zubizarreta et al. se centró en la precisión de las cavidades de acceso endodóntico incluyó trece estudios para su análisis cuantitativo ⁴⁹. Este estudio, encontró que, si bien las técnicas guiadas como la navegación dinámica reportaron desviaciones horizontales de 0.34 mm y angulares de 4.8° en cavidades ultraconservadoras en estudios individuales ⁴⁹, la evidencia clínica no permitió confirmar diferencias significativas en la precisión entre las técnicas de navegación asistida (estática vs. dinámica) en la localización de conductos radiculares ⁴⁹. La heterogeneidad entre los estudios se evaluó mediante el test Q y el estadístico I^2 ⁴⁹. Sin embargo, en otro metaanálisis, Jain et al. investigaron específicamente la navegación estática, incluyendo once estudios principalmente in vitro o ex vivo ¹² y encontraron una tasa de éxito global en la localización de conductos del 95.48% para esta técnica ¹². Este éxito fue estadísticamente significativo cuando se comparó con el acceso convencional ($p = 0.0014$), aunque con moderada heterogeneidad

(I2 = 64.3%) entre los estudios incluidos ¹². Las revisiones sistemáticas también destacan la utilidad de las técnicas guiadas para localizar canales en casos complejos, como señalaron en un estudio Moreno-Rabié et al, donde nos explican como la localización de conductos radiculares es independientemente de la experiencia del operador, con una tasa de éxito reportada del 92% frente al 42% de la técnica tradicional. ³⁵. Todas estas revisiones que hemos comentado están documentados y tienen heterogeneidad metodológica significativa con predominio de estudios *in vitro*, *ex vivo* y reportes de caso sobre ensayos clínicos aleatorizados. ^{42, 12, 14, 50}, proporcionan un respaldo empírico sustancial a la superioridad de las técnicas guiadas, especialmente en la tasa de éxito para localizar conductos en casos complejos y para el tratamiento de la calcificación, justificando de esta forma el por qué de nuestro estudio.

La evolución de tecnologías que van desde la implantología hacia la endodoncia representa un fenómeno natural en la evolución de las especialidades odontológicas. Los sistemas SN y DN han demostrado resultados predecibles en el campo implantológico ^{51, 52}, aunque es crucial reconocer que la evidencia disponible proviene predominantemente de estudios *in vitro*, con una representación limitada de investigaciones clínicas ^{53, 54}. Esta brecha entre la validación experimental y la aplicación clínica constituye un área crítica para futuras investigaciones.

Los datos cuantitativos reportados en la literatura revelan un espectro de precisión variable: Ackerman et al. ⁵⁵ documentaron una precisión media de 2,63 (1,38) mm para SN en cirugía endodóntica, mientras que Fan et al. ⁵⁶ demostraron que las rejillas prefabricadas ofrecen una precisión significativamente superior (0,66 [0,54] mm)

comparada con las osteotomías realizadas mediante técnica FH (1,92 [1,05] mm). Nuestros hallazgos, aunque presentaron una desviación estándar elevada en las mediciones coroneales y angulares del grupo SN, se alinean con los valores reportados en la literatura de implantología guiada ⁵⁷.

La superación de las limitaciones inherentes a la técnica de acceso endodóntico a mano alzada (FH: *freehand*) en situaciones clínicas desafiantes, como la obliteración del sistema de conductos radiculares, ha impulsado el desarrollo y la adopción de técnicas asistidas por ordenador. En este contexto, los sistemas de navegación estática (SN), navegación dinámica (DN) y, más recientemente, la realidad aumentada (AR), se presentan como alternativas prometedoras ^{47, 27, 58}. La evaluación comparativa de estas modalidades es crucial para determinar su eficacia diferencial y guiar su aplicación clínica en escenarios específicos. Estudios *in vitro* han abordado esta comparación directa, proporcionando datos cuantitativos sobre la precisión y otros parámetros relevantes. Por ejemplo, un estudio de Zubizarreta et al. que comparó SN, DN y FH para la preparación de cavidades de acceso en dientes anteriores unirradiculares, no halló diferencias estadísticamente significativas entre SN y DN en las desviaciones horizontal coronal, horizontal apical o angular ²⁷. Sin embargo, ambas técnicas guiadas demostraron una precisión significativamente superior en estas métricas en comparación con el grupo FH ²⁷. En términos de valor absoluto, el grupo de DN mostró cavidades de acceso endodóntico más precisas que el grupo de SN en cuanto a la desviación angular y la desviación horizontal (medida en el punto de entrada coronal y en el punto final apical) ²⁷. En contraste, otro estudio comparativo Huth et al. compararon SN, DN (usando Denacam system: mininavident) y FH y descubrieron diferencias significativas en la desviación angular; siendo SN la técnica más ($1.12 \pm 0.85^\circ$), seguida por DN ($2.82 \pm$

1.8°), y FH presentando la mayor desviación ($9.53 \pm 6.36^\circ$)⁵⁸. Para las desviaciones en la base y la punta de la fresa, SN también mostró significativamente menores desviaciones que FH y DN, sin diferencias significativas entre FH y DN en estos parámetros específicos⁵⁸. Estos hallazgos sugieren que, si bien ambas técnicas guiadas superan ampliamente a la técnica a mano alzada en precisión^{27, 58}, puede existir variabilidad en los resultados de precisión entre SN y DN dependiendo del sistema específico empleado y la métrica evaluada^{27, 58}.

También podemos decir que existen otros factores comparativos relevantes como la preservación de la sustancia dental y el tiempo operatorio, más allá de la precisión posicional y angular,⁵⁸. En algunos estudios se observa como técnica FH tiende a resultar en una mayor pérdida de sustancia dental debido a que es más difícil dirigir la trayectoria de fresado y se necesita ensanchar la cavidad para obtener una mejor visualización^{23, 59, 58}. Huth et al realizaron una comparación entre SN y DN y reportaron que DN causó menor pérdida de sustancia, seguida de SN, y FH la mayor⁵⁸. Esta mayor preservación tisular con las técnicas guiadas, particularmente con DN en algunos estudios, se traduce en un beneficio clínico significativo, especialmente en dientes con anatomía comprometida o con necesidad de restauraciones posteriores⁴⁷. Respecto al tiempo operatorio, los estudios comparativos han mostrado resultados variables; donde FH es a menudo la técnica más rápida⁵⁸ y DN parece ser significativamente más lenta en algunos contextos, lo que podría atribuirse a la curva de aprendizaje y la necesidad de atención constante a la tecnología digital^{58, 23, 60}. Sin embargo, otras investigaciones han encontrado que el tiempo para la preparación del acceso es comparable entre DN y FH, pero también nos dicen que el tiempo total del procedimiento guiado debe incluir también el tiempo empleado en la planificación previa⁵⁹. Otra ventaja de la técnica DN, radica en la capacidad de

adaptación intraoperatoria, la cual, permite ajustes en tiempo real a la trayectoria de perforación ^{25, 36, 61}, a diferencia de la técnica SN, debido a la rigidez inherente a sus plantillas. Todos estos aspectos pueden ser particularmente valiosos en casos con anatomía complicada o no predecible y en la gestión de complicaciones inesperadas durante el procedimiento ⁴⁷. Aunque la evidencia actual se basa predominantemente en estudios *in vitro* ^{25, 27, 58}, los resultados sugieren que las técnicas guiadas (SN y DN) ofrecen una mejora significativa sobre la técnica a mano alzada en la localización de conductos radiculares, especialmente en dientes calcificados o con anatomía compleja ^{47, 24, 27, 58}. La elección entre SN y DN podría depender varios factores, como la precisión (en algunos estudios (en algunos estudios a favor de la técnica SN), flexibilidad intraoperatoria y una mínima pérdida de sustancia (en algunos estudios a favor de la técnica DN), la infraestructura tecnológica disponible y la experiencia del operador con cada sistema ^{47, 58}. Aunque la realidad aumentada (AR) representa una evolución tecnológica con potencial para integrar la guía directamente en el campo visual del operador, su comparación directa y sistemática con SN y DN en endodoncia es un área de investigación que requiere más evidencia y estudio ^{34, 61}. Por tanto, el éxito de la implementación de estas tecnologías no solo requiere la elección sobre que sistema es más adecuado para un caso clínico específico, sino también una comprensión profunda de todos factores técnicos que influyen en la precisión del sistema y en el rendimiento del mismo.

La precisión de los sistemas de navegación no puede analizarse de manera aislada debido a que múltiples factores influyen en su rendimiento. Schneider et al identificaron desviaciones angulares con una media de 5,26° en plantillas quirúrgicas dentosoportadas para implantes ⁶², atribuible a variables inherentes al proceso de planificación y

fabricación. Los sistemas de escaneo intraoral, piedra angular de estas tecnologías, presentan sensibilidades específicas a factores ambientales y operativos: iluminación ⁶³, temperatura ambiente ⁶⁴, duración del escaneo y número de fotogramas ⁶⁵, así como distancias y angulaciones de captura ⁶⁶. Paralelamente, las limitaciones en la resolución espacial de los escaneos CBCT representan otro desafío técnico, ya que requieren un balance equilibrado entre la calidad de imagen necesaria para la visualización del sistema de conductos y la exposición radiológica del paciente ⁶⁷, ⁶⁸.

La evolución hacia sistemas sin casquillos marca un hito importante en la endodoncia guiada. Torres et al. ⁶⁹ han demostrado que esta modalidad ofrece ventajas técnicas significativas para el acceso en casos de obliteración pulpar. De manera similar, Koch et al. ⁷⁰ reportaron desviaciones notablemente bajas (0,31-0,68 mm) utilizando plantillas impresas en 3D, aunque estos resultados superiores a los nuestros podrían atribuirse al uso de modelos artificiales de resina ⁷¹, por lo que se debe tener en cuenta importancia del sustrato experimental en la interpretación de resultados.

Al evaluar los beneficios de la endodoncia guiada, no solo debemos centrarnos en su alta precisión. Un aspecto fundamental, especialmente en los sistemas dinámicos y sin casquillos, es su capacidad para preservar la estructura dental. Este enfoque es crucial para proteger la dentina pericervical, un tejido vital para la fortaleza del diente. La integridad de esta dentina determina directamente la resistencia a la fractura y, por tanto, la supervivencia a largo plazo del diente tratado. ⁶⁹, ⁸, ⁴⁷, ⁴⁸, ⁷², ⁷³, ⁵⁹, ²⁴, ¹².

La navegación guiada permite realizar preparaciones de cavidades de acceso mínimamente invasivas o ultraconservadoras, lo que contrasta con el enfoque de acceso convencional que a menudo resulta en una pérdida significativa de estructura dental, particularmente en casos de calcificación ^{24, 48, 46, 34}. Diversos estudios *in vitro* han cuantificado la reducción en el volumen de dentina removida al emplear técnicas guiadas en comparación con el método a mano alzada (FH). Por ejemplo, la pérdida media de sustancia fue significativamente menor con la navegación dinámica en tiempo real (RTGE) (10.5 mm³) que con el método convencional (CONV) (29.7 mm³) ⁷⁴. De manera similar, se ha reportado que las cavidades de acceso preparadas con navegación dinámica presentan un volumen medio de 21 mm³, considerablemente menor que los 49.9 mm³ observados con la técnica a mano alzada ⁵⁹, aunque ligeramente superior a los 9.8 mm³ reportados para guías estáticas en algunos estudios ⁵⁹. Otras investigaciones comparativas han corroborado que el volumen de tejido dental removido es significativamente menor con el acceso guiado en diversos tipos de dientes, incluyendo incisivos y molares, en comparación con el acceso convencional ¹². Específicamente, estudios citados en la literatura documentan pérdidas de sustancia con acceso guiado que oscilan, por ejemplo, entre 10.3 mm³ para incisivos y 51.8 mm³ para molares utilizando guías estáticas, frente a 16.1 mm³ y 99.3 mm³, respectivamente, con la técnica a mano alzada ¹². Esta reducción sustancial en la eliminación de tejido dental contribuye directamente a mejorar la resistencia a la fractura del diente remanente y a minimizar la remoción impredecible de sustancia que puede ocurrir durante los intentos a ciegas de localizar conductos calcificados ¹². Un hallazgo relevante es que, mientras que en la técnica convencional la pérdida de sustancia puede variar significativamente entre operadores con diferente nivel de experiencia, la navegación dinámica parece disminuir esta dependencia, permitiendo resultados más consistentes y conservadores independientemente de la habilidad clínica

del operador ⁷⁴. La demostrada precisión y la capacidad para minimizar la remoción de tejido confieren a la navegación dinámica ventajas significativas para su aplicación clínica, particularmente en escenarios de endodoncia compleja.

La navegación dinámica representa una evolución natural de los sistemas estáticos, ofreciendo ventajas únicas en términos de adaptabilidad intraoperatoria. Las revisiones sistemáticas describen la navegación dinámica como una técnica que utiliza dispositivos de seguimiento de movimiento conectados a la pieza de mano dental y al paciente, comparando continuamente la trayectoria creada con la trayectoria planificada mediante software basado en imágenes CBCT ^{50,73}. Esta capacidad de seguimiento en tiempo real permite la visualización continua de la posición de la fresa, guiando al clínico hacia el área objetivo ⁷³. Esto facilita ajustes en tiempo real durante el procedimiento, a diferencia de las guías estáticas ⁷³. Además, permite la recalibración y el retratamiento en caso de imprecisiones, eliminando la necesidad de exposiciones adicionales a la radiación CBCT y los costos y tiempos asociados a la fabricación de férulas ⁵⁰. Aunque el costo inicial del sistema puede ser considerable, estas características y beneficios reportados mejoran la viabilidad clínica en la consulta ⁵⁰. Gambarini et al, han documentado desviaciones horizontales de apenas 0,34 mm y angulares de 4,8° en cavidades ultraconservadoras ²⁹, resultados que han impulsado su aplicación en procedimientos de mayor complejidad como la microcirugía endodóntica ⁷⁵. Adicionalmente, se han evaluado la precisión tridimensional (3D) de esta técnica, y se ha reportado una desviación horizontal bidimensional (2D) promedio desde el orificio del conducto de 0.9 mm, la cual fue significativamente mayor en dientes maxilares ⁷⁶. La desviación 3D promedio desde el orificio del conducto fue de 1.3 mm, siendo marginalmente superior en dientes maxilares ⁷⁶. La desviación angular 3D promedio fue de 1.7 grados,

significativamente mayor en molares comparados con premolares ⁷⁶. Estas discrepancias 3D y 2D resultaron independientes de la profundidad del orificio del conducto ⁷⁶. Es particularmente relevante que un metaanálisis reciente no encontró diferencias significativas entre SN y DN en la localización de conductos radiculares ⁷⁷, sugiriendo que la elección entre ambas modalidades podría basarse en consideraciones prácticas más que en diferencias de precisión absoluta. Existen cuatro sistemas DNS reportados en la literatura (Navident, X-guide, ImplaNavig, y DENACAM). La eficacia de los mismos aún requiere comparación ⁵⁰.

Se están desarrollando nuevos métodos para evaluar la navegación dinámica, que incluyen el uso de modelos de mandíbula impresos en 3D con simulaciones de conductos calcificados. Gracias a esto, es posible realizar estudios de laboratorio muy precisos y en condiciones controladas ¹⁸. La precisión se cuantifica mediante la medición digital de discrepancias (horizontales 2D y 3D, verticales, angulares) entre la planificación virtual y las preparaciones de acceso realizadas, utilizando tomografías computarizadas de haz cónico superpuestas ¹⁸. Sistemas como Navident se emplean con fresas de alta velocidad para ejecutar las preparaciones ¹⁸. Estos estudios demuestran el potencial de la tecnología de navegación dinámica 3D con fresas de alta velocidad para preservar la estructura dental y localizar con precisión conductos radiculares en dientes con obliteración pulpar ¹⁸. Sin embargo, se requiere habilidad técnica, coordinación mano-ojo y destreza manual, por lo que es esencial una formación adecuada previa a su uso clínico ¹⁸. La evidencia clínica emergente refuerza el valor de DN en casos complejos. Wu et al. ²² y Panithini et al. ⁷⁸ han documentado mejoras sustanciales en la localización de conductos calcificados, mientras que Leontiev et al. ⁷⁹ han enfatizado el potencial de esta tecnología para realizar preparaciones mínimamente invasivas, un aspecto crucial en la preservación de la

estructura dental remanente. Gambarini et al. evaluaron la aplicación de sistemas de navegación dinámica en la preparación de cavidades de acceso ultraconservadoras.²⁹ Estudios comparativos con enfoques manuales han identificado diferencias significativas, donde los grupos de navegación dinámica mostraron valores medios más bajos en la angulación (4.8°) y en la distancia máxima desde la posición ideal (0.34 mm), en contraste con los enfoques manuales (21.2° y 0.88 mm)²⁹. Esto sugiere que el uso de DNS potencia los beneficios de las cavidades de acceso ultraconservadoras al minimizar el riesgo de debilitamiento iatrogénico de porciones críticas de la corona y, a su vez, simplifica y reduce las influencias negativas en las fases posteriores de limpieza y preparación de los conductos radiculares²⁹

La realidad aumentada se está consolidando como la tecnología más avanzada en el campo de la navegación endodóntica. Ha superado su aplicación original como método de enseñanza⁸⁰ para establecerse como una alternativa terapéutica completamente funcional y prometedora

Su principal ventaja es que simplifica el proceso. Al no necesitar fabricar nada entre la planificación y la ejecución clínica, el procedimiento se puede llevar a cabo de inmediato.⁸¹ Los trabajos pioneros de Farronato et al.⁸² establecieron los valores de referencia para esta tecnología, reportando desviaciones de 0,51 mm coronalmente y 0,77 mm a 4 mm de profundidad, con una desviación angular de $8,5^\circ$. Nuestros hallazgos, consistentes con los de Faus-Matoses et al.³⁶ (desviación coronal: 0,76 mm, apical: 0,79 mm, angular: $3,05^\circ$), validan la reproducibilidad de estos resultados cuando se emplean metodologías similares. Este autor realizó uno de los primeros estudios comparativos sistemáticos utilizando HoloLens2, demostrando diferencias estadísticamente significativas entre AR y técnica manual. Las desviaciones medias en el punto de entrada

coronal fueron de 0.76 mm para AR versus 2.77 mm para la técnica manual, mientras que en el punto final apical las desviaciones fueron de 0.79 mm versus 2.98 mm respectivamente. Estos resultados, mostrando una precisión aproximadamente cuatro veces mayor para AR, establecen un punto de referencia prometedor para el uso de esta tecnología emergente.

Adicionalmente, estudios comparativos, como el de Bosshard et al.⁶¹ en apicoectomías, han demostrado que la realidad aumentada asistida (AR-A) alcanza una precisión comparable a la de las plantillas guiadas (TG-A). En su modelo ex vivo, reportaron desviaciones angulares medias de $5,33^{\circ} (\pm 2,96^{\circ})$ para AR-A y $5,23^{\circ} (\pm 2,48^{\circ})$ para TG-A, con desviaciones de profundidad medias de 0,27 mm ($\pm 2,32$ mm) y 0,90 mm ($\pm 1,84$ mm), respectivamente, sin diferencias significativas entre ambas técnicas en cuanto a desviación angular y de profundidad⁶¹.

El mecanismo de funcionamiento de la AR se basa en la superposición de la información digital sobre el campo visual del operador. Esta forma de interactuar representa un antes y un después en la relación entre los humanos y la tecnología⁸². Dentro del desarrollo de aplicaciones, se han explorado sistemas prototipo basados en dispositivos de realidad aumentada montados en la cabeza (HMD) para el tratamiento de conductos radiculares⁸⁰, aunque estudios iniciales han reportado errores de desviación media del extremo de la fresa de 2,8 mm y máximos de 5,2 mm, lo que ha requerido el uso de modelos dentales ampliados en ciertos estudios⁸⁰. Esta tecnología ha demostrado su valor en múltiples disciplinas odontológicas, destacando por su precisión y capacidad para prevenir complicaciones, aunque sin reducir significativamente los tiempos

operatorios ⁸³. Más allá de la navegación puramente AR, la integración de dispositivos de realidad aumentada con sistemas de navegación dinámica (DNS) ha mostrado resultados prometedores en procedimientos como la osteotomía y resección radicular ³³, así como en la remoción de postes de fibra ³⁴. Estos sistemas híbridos AR+3D-DNS han demostrado ser más precisos que los sistemas 3D-DNS solos en estudios in vitro, con menores desviaciones 2D y 3D, y en algunos casos, mayor eficiencia temporal en procedimientos quirúrgicos como la osteotomía y resección radicular ³³. De manera similar, Martinho et al demostró que la combinación de AR-HMD con DNS ha mejorado la precisión en la remoción de postes de fibra en molares maxilares, mostrando desviaciones 3D y angulares significativamente menores que el DNS solo, sin sacrificar la eficiencia temporal ³⁴. Como herramienta educativa, ha demostrado ser particularmente valiosa. ^{84, 85}. Las innovaciones como los sistemas holográficos hacen posible visualizar la compleja anatomía interna de las raíces de los dientes ⁸⁶, y están revolucionando y cambiando la forma de enseñanza en endodoncia

La aplicación de la endodoncia guiada ha trascendido la fase de simulación y entrenamiento. Actualmente, su uso en pacientes reales está siendo documentado en publicaciones científicas, lo que ofrece una visión preliminar sobre su eficacia y resultados en un entorno clínico real. Existen estudios que nos dan una idea clara de la utilidad de esta tecnología en situaciones clínicas complicadas. Estudios observacionales como el de Buchgreitz et al ¹¹ evaluaron su eficacia en 50 pacientes con conductos radiculares obstruidos. Otros estudios muestran cómo se ha aplicado en casos desafiantes, como el tratamiento de canales severamente calcificados ¹⁵, Además, estudios a más largo plazo, como el de Ribeiro et al. ⁸⁷ que siguió a pacientes ancianos durante 3 años, confirman que es una opción viable y ofrecen información valiosa sobre sus resultados en situaciones clínicas complejas. El reciente consenso de expertos en terapia guiada

digital para enfermedades endodónticas ⁶ refuerza esta tendencia, avalando el uso de las tecnologías de navegación digital (tanto estática como dinámica) para el manejo de casos complejos, incluyendo dientes con obliteración, anomalías anatómicas o retratamientos, y destacando sus reportados beneficios en términos de precisión, ahorro de tiempo y abordaje mínimamente invasivo basados en la evidencia actual, predominantemente proveniente de reportes de caso e investigación básica ⁶. No obstante, se recomienda cautela al trasladar los excelentes resultados y los tiempos reducidos observados en el laboratorio a la práctica clínica. Factores propios del paciente y la complejidad inherente a un procedimiento real pueden influir en la efectividad y extender la duración del tratamiento, especialmente durante la fase inicial de adaptación a estas tecnologías avanzadas, ya existe una curva aprendizaje para dominar estas nuevas herramientas.^{46, 16, 88, 89, 73, 50, 59, 49, 58}. Si bien la evidencia clínica inicial es prometedora y el consenso de expertos apoya su aplicación en casos seleccionados ⁶, la base de investigación clínica de alto nivel, como ensayos controlados aleatorizados con seguimientos a largo plazo, aún es limitada ^{46, 72, 50}, lo que subraya la necesidad de realizar más estudios que validen completamente estas técnicas en una diversidad de escenarios clínicos.

Debemos señalar las limitaciones inherentes a nuestro diseño experimental. Su carácter *in vitro* (realizado en laboratorio) y el entorno controlado son factores que pueden dificultar la aplicación directa de nuestros resultados en el ámbito clínico. Más allá de las limitaciones propias de un estudio de laboratorio, usar estas técnicas de navegación en la consulta dental diaria añade nuevas dificultades. En concreto, la navegación estática (SN) ofrece una guía predefinida pero es inflexible, lo que dificulta la adaptación si surgen imprevistos durante el procedimiento. Además, depende de la fabricación de una férula o guía, un proceso que puede resultar costoso y llevar bastante tiempo ⁹⁰. La navegación

dinámica (DN), aunque ofrece mayor flexibilidad en tiempo real, requiere una inversión inicial significativa en equipamiento (hardware y software) e infraestructura ⁹¹, lo que puede representar una barrera económica sustancial para su adopción generalizada, especialmente en regiones con recursos limitados. Por su parte, la realidad aumentada (AR), como tecnología emergente, presenta una precisión que puede ser variable, fuertemente influenciada por la calidad del seguimiento espacial y el rendimiento del hardware del dispositivo montado en la cabeza ³⁴. La viabilidad de estas técnicas guiadas depende de factores prácticos y científicos. Por un lado, su implementación está limitada por la disponibilidad de la tecnología necesaria en cada zona geográfica, como los equipos de tomografía 3D (CBCT), escáneres intraorales y servicios de impresión 3D. Por otro lado, la evidencia científica actual, basada mayormente en reportes de casos aislados, no es suficiente. Es urgente realizar estudios experimentales más robustos para validar estas tecnologías y estudios clínicos que sigan a los pacientes a largo plazo para evaluar los resultados en un entorno real con pacientes.⁹¹. Recomendamos el uso de fresas de menor diámetro con el objetivo de preservar la dentina radicular. Esta es una conclusión práctica de nuestro estudio, y busca minimizar uno de los riesgos principales en la preparación de cavidades. Sin embargo, para lograrlo con éxito, la precisión de la guía es indispensable.⁹².

Un aspecto crítico que merece énfasis es la curva de aprendizaje asociada con DN. Esta curva es notablemente más pronunciada que la de la navegación estática o incluso la de la realidad aumentada, ya que requiere el desarrollo de una alta habilidad técnica, coordinación mano-ojo precisa y destreza manual para seguir la guía visual en tiempo real ⁶⁰. Si bien la navegación estática también implica una curva de aprendizaje relacionada con el software de planificación y el diseño/fabricación de la férula, el control

activo del instrumento en tiempo real en DN y AR introduce una complejidad operativa distinta. El éxito de la planificación preoperatoria se basa en dos pilares: la competencia técnica y una notable experiencia clínica. Los errores cometidos en esta fase inicial se extienden inevitablemente en todas las dimensiones espaciales, lo que compromete el resultado final. Esta situación resalta la necesidad crítica de implementar programas de formación estructurados antes de utilizar estas tecnologías en la práctica clínica ⁶⁰, ⁹¹. Se recomienda un entrenamiento práctico intensivo en modelos de simulación antes de tratar casos reales. La cantidad de práctica necesaria dependerá de la dificultad del caso y de la tecnología utilizada, ya que aún no hay un número estándar definido por los expertos. Para facilitar la adopción de estos sistemas, se sugiere un enfoque gradual: empezar con los casos menos complejos o combinar las nuevas guías con las técnicas convencionales. A futuro, la investigación debe enfocarse en comparar la curva de aprendizaje de los distintos sistemas, medir la eficacia de los entrenamientos y establecer un número óptimo de casos prácticos para garantizar la competencia del profesional.⁹¹. Asimismo, es crucial investigar el impacto de la experiencia del operador en los resultados obtenidos con cada técnica ⁹¹, si bien algunos estudios sugieren que los sistemas guiados pueden disminuir parcialmente la influencia de la experiencia, permitiendo a operadores menos experimentados obtener resultados comparables a los de especialistas en casos complejos

⁹⁰.

A partir de los resultados obtenidos en el presente estudio experimental *in vitro*, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1. (Objetivo general)

Las técnicas de preparación de cavidades de acceso endodóntico asistidas por ordenador —navegación estática (SN), navegación dinámica (DN) y realidad aumentada (AR)— demostraron una precisión significativamente superior al método convencional a mano alzada (FH) en dientes con conductos radiculares calcificados. Estas tecnologías permitieron una reproducción más fiel de la planificación preoperatoria y un control más exacto de la dirección y profundidad de la cavidad, reduciendo los errores iatrogénicos y mejorando la localización de los conductos radiculares.

2. (Objetivo específico 1: desviación horizontal coronal)

Las desviaciones horizontales en el punto de entrada coronal fueron menores en los grupos con navegación asistida por ordenador en comparación con el grupo convencional. En particular, la técnica de realidad aumentada (AR) registró la desviación coronal más baja (0.72 mm), evidenciando una mayor precisión en el posicionamiento inicial de la cavidad de acceso.

3. (Objetivo específico 2: desviación horizontal apical)

En el punto final apical, las desviaciones horizontales fueron significativamente menores en los grupos SN, DN y AR que en el grupo FH. La realidad aumentada (AR) obtuvo nuevamente los mejores resultados (0.81 mm), reflejando una mayor exactitud en la trayectoria y profundidad de la preparación endodóntica.

4. (Objetivo específico 3: desviación angular)

En cuanto a las desviaciones angulares, las técnicas de realidad aumentada (AR) y navegación dinámica (DN) mostraron los valores más bajos (2.87° y 3.19°, respectivamente), lo que indica una mejor alineación entre la cavidad planificada y la ejecutada. La navegación estática (SN) y el método convencional (FH) presentaron mayores desviaciones, confirmando su menor precisión angular.

5. (Objetivo específico 4: comparación global y desempeño de la AR)

La realidad aumentada (AR) se posicionó como la tecnología más precisa y eficiente entre todas las evaluadas, mostrando diferencias significativamente menores en la eliminación de dentina y en la alineación tridimensional de la cavidad. Su desempeño superior frente a la navegación estática (SN), la dinámica (DN) y el método convencional (FH) confirma su potencial como herramienta clínica de alta precisión en endodoncia asistida por ordenador.

Conclusión final:

En conjunto, los resultados de este estudio respaldan el uso de sistemas de navegación asistida —especialmente la realidad aumentada— en la preparación de cavidades de acceso endodóntico en dientes con conductos calcificados. Estas tecnologías no solo mejoran la precisión del procedimiento, sino que también contribuyen a la preservación de la estructura dental, la reducción de errores operatorios y la optimización del pronóstico clínico en casos complejos.

-
- 1 Vertucci FJ. Root canal morphology and its relationship to endodontic procedures. *Endod Topics*. 2005;10:3-29.
 - 2 Martins JNR, Marques D, Mata A, Caramês J. Root and root canal morphology of the permanent dentition in a Caucasian population: a cone-beam computed tomography study. *Int Endod J*. 2016;50(11):1013-26.
 - 3 Patel S, Durack C, Abella F, Roig M, Shemesh H, Lemberg K. Cone beam computed tomography in Endodontics - a review. *Int Endod J*. 2015;48(1):3-15.
 - 4 Vinagre A, Castanheira C, Messias A, Palma PJ, Ramos JC. Management of Pulp Canal Obliteration-Systematic Review of Case Reports. *Medicina (Kaunas)*. 2021;56(11):1236.
 - 5 McCabe PS, Dummer PM. Pulp canal obliteration: an endodontic diagnosis and treatment challenge. *Int Endod J*. 2012;45(2):166-96.
 - 6 Wei X, Du Y, Zhou X, et al. Expert consensus on digital guided therapy for endodontic diseases. *Int J Oral Sci*. 2023;15:54.
 - 7 Krastl G, Zehnder MS, Connert T, Weiger R, Kühl S. Guided Endodontics: a novel treatment approach for teeth with pulp canal calcification and apical pathology. *Dent Traumatol*. 2016;32(3):240-6.
 - 8 Zehnder MS, Connert T, Weiger R, Krastl G, Kühl S. Guided endodontics: accuracy of a novel method for guided access cavity preparation and root canal location. *Int Endod J*. 2016;49(10):966-72.
 - 9 Connert T, Zehnder MS, Weiger R, Kühl S, Krastl G. Microguided Endodontics: accuracy of a miniaturized technique for apically extended access cavity preparation in anterior teeth. *J Endod*. 2017;43(5):787-90.
 - 10 Torres A, Lerut K, Lambrechts P, Jacobs R. Guided Endodontics: Use of a Sleeveless Guide System on an Upper Premolar with Pulp Canal Obliteration and Apical Periodontitis. *J Endod*. 2021;47(1):133-139.
 - 11 Buchgreitz J, Buchgreitz M, Bjørndal L. Guided root canal preparation using cone beam computed tomography and optical surface scans - an observational study of pulp space obliteration and drill path depth in 50 patients. *Int Endod J*. 2019;52(5):559-568.
 - 12 Jain RN, Rao RD, Jain A, Kumar PS, Khosla S, Dey TS. Efficacy of Computer-aided Static Navigation on Accuracy of Guided Endodontic Root Canal Treatment: A Systematic Review and Meta-analysis. *World J Dent*. 2023;14(11):1004-1012.

-
- 13 Connert T, Krug R, Eggmann F, Emsermann I, ElAyouti A, Weiger R, et al. Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional-printed Teeth. *J Endod.* 2019;45(3):327-31.
 - 14 Peña-Bengoa F, Valenzuela M, Flores MJ, Dufey N, Pinto KP, Silva EJNL. Effectiveness of guided endodontics in locating calcified root canals: a systematic review. *Clin Oral Investig.* 2023;27:2359–2374.
 - 15 Llaquet Pujol M, Vidal C, Mercadé M, Muñoz M, Ortolani-Seltenerich S. Guided Endodontics for Managing Severely Calcified Canals. *J Endod.* 2021;47(2):315-321.
 - 16 Connert T, Weiger R, Krastl G. Present status and future directions - Guided endodontics. *Int Endod J.* 2022;55 Suppl 4:995-1002.
 - 17 Fonseca Tavares WL, de Oliveira Murta Pedrosa N, Moreira RA, Campos LC, Henriques LCF, Ribeiro Sobrinho AP. Limitations and Management of Static-guided Endodontics Failure. *J Endod.* 2022;48(2):273-279.
 - 18 Chong BS, Dhesi M, Makdissi J. Computer-aided dynamic navigation: a novel method for guided endodontics. *Quintessence Int.* 2019;50(3):196-202.
 - 19 Vasudevan A, Santosh SS, Selvakumar RJ, Sampath DT, Natanasabapathy V. Dynamic Navigation in Guided Endodontics - A Systematic Review. *Eur Endod J.* 2022;7(2):81-91.
 - 20 Martinho FC, Griffin IL, Corazza BJM. Current Applications of Dynamic Navigation System in Endodontics: A Scoping Review. *Eur J Dent.* 2023;17(3):569-586.
 - 21 Yang X, Zhang Y, Chen X, Huang L, Qiu X. Limitations and Management of Dynamic Navigation System for Locating Calcified Canals Failure. *J Endod.* 2024;50(1):96-105.
 - 22 Wu M, Liu M, Cheng Y, Tang W, Yan P, Jiang H. Treatment of Pulp Canal Obliteration Using a Dynamic Navigation System: Two Case Reports. *J Endod.* 2022;48(11):1441-1446.
 - 23 Torres A, Boelen GJ, Lambrechts P, Pedano MS, Jacobs R. Dynamic navigation: a laboratory study on the accuracy and potential use of guided root canal treatment. *Int Endod J.* 2021;54(9):1659-1667.
 - 24 Jain SD, Carrico CK, Bermanis I. 3-dimensional accuracy of dynamic navigation technology in locating calcified canals. *J Endod.* 2020;46(6):839-845.
 - 25 Dianat O, Nosrat A, Tordik PA, Aldahmash SA, Romberg E, Price JB, et al. Accuracy and Efficiency of a Dynamic Navigation System for Locating Calcified Canals. *J Endod.* 2020;46(11):1719-1725.

-
- 26 Huth KC, Borkowski L, Liebermann A, Berlinghoff F, Hickel R, Schwendicke F, et al. Comparing accuracy in guided endodontics: dynamic real-time navigation, static guides, and manual approaches for access cavity preparation - an in vitro study using 3D printed teeth. *Clin Oral Investig.* 2024;28(1):212.
- 27 Zubizarreta-Macho Á, Muñoz AP, Deglow ER, Agustín-Panadero R, Álvarez JM. Accuracy of computer-aided dynamic navigation compared to computer-aided static procedure for endodontic access cavities: an in vitro study. *J Clin Med.* 2020;9(1):129.
- 28 Jonaityte EM, Bilvinaite G, Drukeinis S, Torres A. Accuracy of Dynamic Navigation for Non-Surgical Endodontic Treatment: A Systematic Review. *J Clin Med.* 2022;11(12):3441.
- 29 Gambarini G, Galli M, Morese A, Seracchiani M, Stefanelli LV, Di Nardo D, et al. Precision of Dynamic Navigation to Perform Endodontic Ultraconservative Access Cavities: A Preliminary In Vitro Analysis. *J Endod.* 2020;46(9):1286-1290.
- 30 Brüllmann DD, Alvarez P, Willershausen B. Recognition of root canal orifices in video sequences as a future support system during endodontic treatment. *J Endod.* 2009;35(10):1400-3.
- 31 Brüllmann DD, Weichert CI, Daubländer M. Intraoral cameras as a computer-aided diagnosis tool for root canal orifices. *J Dent Educ.* 2011;75(11):1452-7.
- 32 Bruellmann DD, Tjaden H, Schwanecke U, Barth P. An optimized video system for augmented reality in endodontics: a feasibility study. *Clin Oral Investig.* 2013;17(2):441-8.
- 33 Martinho FC, Griffin IL, Price JB, Melo MAS, Fay GG. Augmented reality and 3-dimensional dynamic navigation system integration for osteotomy and root-end resection. *J Endod.* 2023;49:1362–1368.
- 34 Martinho FC, Qadir SJ, Griffin IL, Melo MAS, Fay GG. Augmented Reality Head-Mounted Device and Dynamic Navigation System for Postremoval in Maxillary Molars. *J Endod.* 2024;50(6):844-851.
- 35 Moreno-Rabié C, Torres A, Lambrechts P, Jacobs R. Clinical applications, accuracy and limitations of guided endodontics: a systematic review. *Int Endod J.* 2020;53(2):214-231.
- 36 Faus-Matoses V, Faus-Llácer V, Moradian T, Riad Deglow E, Ruiz-Sánchez C, Hamoud-Kharrat N, et al. Accuracy of Endodontic Access Cavities Performed Using an Augmented Reality Appliance: An In Vitro Study. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(18):11167.

-
- 37 Fahim S, Maqsood A, Das G, Ahmed N, Saquib S, Lal A, Khan AAG, Alam MK. Augmented Reality and Virtual Reality in Dentistry: Highlights from the Current Research. *Appl Sci*. 2022;12(8):3719.
- 38 Zubizarreta-Macho Á, Muñoz AP, Deglow ER, Agustín-Panadero R, Álvarez JM. Accuracy of computeraided dynamic navigation compared to computer-aided static procedure for endodontic access cavities: an in vitro study. *J Clin Med*. 2020;9(1):129.
- 39 Vertucci FJ. Root canal anatomy of the mandibular anterior teeth. *JADA*. 1974;89(2):369-371.
- 40 Vertucci FJ, Gegauff A. Root canal morphology of the maxillary first premolar. *JADA*. 1979;99(2):194-198.
- 41 Krapez J, Fidler A. Location and dimensions of access cavity in permanent incisors, canines, and premolars. *J Conserv Dent*. 2013;16(5):404-407.
- 42 Banka A, Patri G, Pradhan PK, Lath H. Comparative evaluation between guided endodontics and conventional techniques for calcific metamorphosis – A systematic review and meta-analysis. *J Conserv Dent Endod*. 2024;27:891-896.
- 43 Reis LC, Nascimento VDMA, Lenzi AR. Operative microscopy: indispensable resource for the treatment of pulp canal obliteration—a case report. *Braz J Dent Traumatol*. 2009;1(1):23-26.
- 44 Ngeow T. Gaining access through a calcified pulp chamber: a clinical challenge. *Int Endod J*. 1998;31(5):367-371.
- 45 Chaniotis A, Sousa Dias H, Chanioti A. Negotiation of calcified canals. *J Clin Med*. 2024;13(9):2703.
- 46 Kulinkovych-Levchuk K, Pecci-Lloret MP, Castelo-Baz P, Pecci-Lloret MR, Oñate-Sánchez RE. Guided endodontics: a literature review. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19:13900.
- 47 Ribeiro D, Reis E, Marques JA, Falacho RI, Palma PJ. Guided endodontics: static vs. dynamic computer-aided techniques - a literature review. *J Pers Med*. 2022;12(9):1516.
- 48 Connert T, Krug R, Eggmann F, Emsermann I, ElAyouti A, Weiger R, Kühl S, Krastl G. Guided Endodontics versus Conventional Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using 3-dimensional-printed Teeth. *J Endod*. 2019;45(3):327-331.
- 49 Zubizarreta-Macho Á, Valle Castaño S, Montiel-Company JM, Mena-Álvarez J. Effect of computer-aided navigation techniques on the accuracy of endodontic access cavities: a systematic review and meta-analysis. *Biology*. 2021;10(3):212.

-
- 50 Vasudevan A, Santosh SS, Selvakumar RJ, Sampath DT, Natanasabapathy V. Dynamic Navigation in Guided Endodontics – A Systematic Review. *Eur Endod J*. 2022;7:81-91.
- 51 Jorba-García A, Figueiredo R, González-Barnadas A, Camps-Font O, Valmaseda-Castellón E. Accuracy and the role of experience in dynamic computer guided dental implant surgery: an in-vitro study. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2019;24(1):e76-e83.
- 52 Tahmaseb A, Wu V, Wismeijer D, Coucke W, Evans C. The accuracy of static computer-aided implant surgery: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Implants Res*. 2018;29(suppl 16):416-435.
- 53 Pellegrino G, Taraschi V, Andrea Z, Ferri A, Marchetti C. Dynamic navigation: a prospective clinical trial to evaluate the accuracy of implant placement. *Int J Comput Dent*. 2019;22(2):139-147.
- 54 Aydemir CA, Arısan V. Accuracy of dental implant placement via dynamic navigation or the freehand method: a split-mouth randomized controlled clinical trial. *Clin Oral Implants Res*. 2020;31(3):255-263.
- 55 Ackerman S, Aguilera FC, Buie JM, et al. Accuracy of 3-dimensional–printed endodontic surgical guide: a human cadaver study. *J Endod*. 2019;45(5):615-618.
- 56 Fan Y, Glickman GN, Umorin M, Nair MK, Jalali P. A novel prefabricated grid for guided endodontic microsurgery. *J Endod*. 2019;45(5):606-610.
- 57 Brief J, Edinger D, Hassfeld S, Eggers G. Accuracy of image-guided implantology. *Clin Oral Implants Res*. 2005;16(4):495-501.
- 58 Huth KC, Borkowski L, Liebermann A, Berlinghoff F, Hickel R, Schwendicke F, Reymus M. Comparing accuracy in guided endodontics: dynamic real-time navigation, static guides, and manual approaches for access cavity preparation – an in vitro study using 3D printed teeth. *Clin Oral Investig*. 2024;28:212.
- 59 Jain SD, Saunders MW, Carrico CK, Jadhav A, Deeb JG, Myers GL. Dynamically Navigated versus Freehand Access Cavity Preparation: A Comparative Study on Substance Loss Using Simulated Calcified Canals. *J Endod*. 2020;46(11):1745-1751.
- 60 Manaswini PS, Prabhuji V, Champa C, Sreekha A, Pai VS. Management of Traumatized Teeth With Severely Calcified Canals and Minimally Invasive Access Cavity Using the AReneto® System: A Case Report. *Cureus*. 2024;16(9):e70298.
- 61 Bosshard FA, Valdec S, Dehghani N, Wiedemeier D, Färnstahl P, Stadlinger B. Accuracy of augmented reality-assisted vs. template-guided apicoectomy – An ex vivo comparative study. *Int J Comput Dent*. 2023;26:11-18.

-
- 62 Schneider D, Marquardt P, Zwahlen M, Jung RE. A systematic review on the accuracy and the clinical outcome of computer-guided template-based implant dentistry. *Clin Oral Implants Res.* 2009;20(suppl 4):73-86.
- 63 Revilla-León M, Jiang P, Sadeghpour M, et al. Intraoral digital scans, part 1: influence of ambient scanning light conditions on the accuracy (trueness and precision) of different intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* 2020;124(3):372-378.
- 64 Revilla-León M, Gohil A, Barmak AB, et al. Influence of ambient temperature changes on intraoral scanning accuracy. *J Prosthet Dent.* 2023;130(5):755-760.
- 65 Gómez-Polo M, Cimolai A, Ortega R, Barmak AB, Kojs JC, Revilla-León M. Accuracy, scanning time, and number of photographs of various scanning patterns for the extraoral digitalization of complete dentures by using an intraoral scanner. *J Prosthet Dent.* 2024;131(3):521-528.
- 66 Button H, Kojs JC, Barmak AB, Zeitler JM, Rutkunas V, Revilla-León M. Scanning accuracy and scanning area discrepancies of intraoral digital scans acquired at varying scanning distances and angulations among 4 different intraoral scanners. *J Prosthet Dent.* Published online March 3, 2023.
- 67 Patel S, Durack C, Abella F, Shemesh H, Roig M, Lemberg K. Cone beam computed tomography in endodontics: a review. *Int Endod J.* 2015;48(1):3-15.
- 68 van der Meer WJ, Vissink A, Ng YL, Gulabivala K. 3D computer aided treatment planning in endodontics. *J Dent.* 2016;45:67-72.
- 69 Torres A, Dierickx M, Coucke W, Pedano MS, Lambrechts P, Jacobs R. In vitro study on the accuracy of sleeveless guided endodontics and treatment of a complex upper lateral incisor. *J Dent.* 2023;131:104466.
- 70 Koch GK, Gharib H, Liao P, Liu H. Guided access cavity preparation using cost-effective 3D printers. *J Endod.* 2022;48(7):909-913.
- 71 Vasudevan A, Sundar S, Surendran S, Natanasabapathy V. Tooth substance loss after incisal endodontic access and novel single-tooth template-guided endodontic access in three-dimensional printed resin incisors with simulated pulp canal calcification: a comparative in vitro study. *J Conserv Dent.* 2023;26(3):258-264.
- 72 Muryani A, Aripin D, Dharsono HDA, Rajion ZA, Wicaksono S. A Systematic Review of Research on Guided Access Cavity Preparation Endodontic Treatment: Dentin Preservation Perspectives. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dentistry.* 2025;17:49-63.

-
- 73 Hegde V, Mandke L, Memon K, Ansari M, Srilatha S, Mujawar A. Dynamic navigation in endodontics: A comprehensive literature review. *J Conserv Dent Endod*. 2024;27:1202-1210.
- 74 Connert T, Leontiev W, Dagassan-Berndt D, Kühl S, ElAyouti A, Krug R, et al. Real-time guided endodontics with a miniaturized dynamic navigation system versus conventional freehand endodontic access cavity preparation: substance loss and procedure time. *J Endod*. 2021;47(10):1651-1656.
- 75 Dianat O, Nosrat A, Mostoufi B, Price JB, Gupta S, Martinho FC. Accuracy and efficiency of guided root-end resection using a dynamic navigation system: a human cadaver study. *Int Endod J*. 2021;54(5):793-801.
- 76 Su Y, Chen C, Lin C, Chiang C, Wu Y, Tu M, et al. Guided endodontics: accuracy of access cavity preparation and discrimination of angular and linear deviation on canal accessing ability-an ex vivo study. *BMC Oral Health*. 2021;21(1):606.
- 77 Zubizarreta-Macho Á, Valle Castaño S, Montiel-Company JM, Mena-Álvarez J. Effect of computer-aided navigation techniques on the accuracy of endodontic access cavities: a systematic review and meta-analysis. *Biology (Basel)*. 2021;10(3):212.
- 78 Panithini DB, Sajjan GS, Kinariwala N, Medicharla UD, Varma KM, Kallepalli M. Real-time guided endodontics: a case report of maxillary central incisor with calcific metamorphosis. *J Conserv Dent*. 2023;26(1):113-117.
- 79 Leontiev W, Connert T, Weiger R, Krastl G, Magni E. Dynamic navigation in endodontics: guided access cavity preparation by means of a miniaturized navigation system. *J Vis Exp*. 2022;183.
- 80 Song T, Yang C, Dianat O, Azimi EJHTL. Endodontic guided treatment using augmented reality on a head-mounted display system. *Healthc Technol Lett*. 2018;5(5):201-207.
- 81 Llena C, Folguera S, Forner L, Rodríguez-Lozano FJ. Implementation of augmented reality in operative dentistry learning. *Eur J Dent Educ*. 2018;22(1):e122-e130.
- 82 Farronato M, Torres A, Pedano MS, Jacobs R. Novel method for augmented reality guided endodontics: an in vitro study. *J Dent*. 2023;132:104476.
- 83 Farronato M, Maspero C, Lanteri V, et al. Current state of the art in the use of augmented reality in dentistry: a systematic review of the literature. *BMC Oral Health*. 2019;19(1):135.
- 84 Kwon HB, Park YS, Han JS. Augmented reality in dentistry: a current perspective. *Acta Odontol Scand*. 2018;76(7):497-503.

-
- 85 Aichert A, Wein W, Ladikos A, Reichl T, Navab N. Image-based tracking of the teeth for orthodontic augmented reality. *Med Image Comput Comput Assist Interv.* 2012;15(pt 2):601-608.
- 86 Dolega-Dolegowski D, Proniewska K, Dolega-Dolegowska M, et al. Application of holography and augmented reality based technology to visualize the internal structure of the dental root: a proof of concept. *Head Face Med.* 2022;18(1):12.
- 87 Kiefner P, Connert T, ElAyouti A, Weiger R. Treatment of calcified root canals in elderly people: a clinical study about the accessibility, the time needed and the outcome with a three-year follow-up. *Gerodontology.* 2017;34:164-170.
- 88 Connert T, Zehnder MS, Weiger R, Kühl S, Krastl G. Microguided Endodontics: accuracy of a miniaturized technique for apically extended access cavity preparation in anterior teeth. *J Endod.* 2017;43(5):787-90.
- 89 Kamburoğlu K, Sönmez G, Koç C, Yılmaz F, Tunç O, Isayev A. Access Cavity Preparation and Localization of Root Canals Using Guides in 3D-Printed Teeth with Calcified Root Canals: An In Vitro CBCT Study. *Diagnostics.* 2023;13:2215.
- 90 Shah P, Chong BS. 3D imaging, 3D printing and 3D virtual planning in endodontics. *Clin Oral Investig.* 2018;22:641-654.
- 91 Ma L, Huang T, Wang J, Liao H. Visualization, registration and tracking techniques for augmented reality guided surgery: a review. *Physics in Medicine & Biology.* 2023;68:04
- 92 Cassetta M, Di Mambro A, Giansanti M, Stefanelli LV, Cavallini C. The intrinsic error of a stereolithographic surgical template in implant guided surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg.* 2013;42:264-275.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y USO DE HERRAMIENTAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Dña. Carmen García Franco, autora de la Tesis Doctoral titulada “PREPARACIÓN DE CAVIDADES DE ACCESO ENDODÓNTICO ASISTIDA POR SISTEMAS DE NAVEGACIÓN ESTÁTICA, DINÁMICA Y REALIDAD AUMENTADA EN CONDUCTOS RADICULARES CALCIFICADOS”, dirigida por D. Álvaro Zubizarreta Macho, en el marco del Programa de Doctorado en Cirugía y Odontoestomatología de la Universidad de Salamanca, DECLARA:

1. Que la tesis doctoral presentada es resultado de un trabajo original y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título académico.
2. Que todas las fuentes utilizadas en la elaboración de la tesis han sido debidamente citadas y referenciadas conforme a las normas de integridad científica y académica.
3. Que el uso de herramientas de inteligencia artificial se ha limitado exclusivamente a funciones auxiliares, tales como revisión lingüística, verificación de formato y organización bibliográfica, sin intervención en la generación o interpretación de contenido científico.
4. Que el documento final ha sido verificado mediante software antiplagio, cumpliendo con los estándares de originalidad establecidos por la Universidad de Salamanca.

En prueba de conformidad, firman la presente declaración:

En Salamanca, a 15 de octubre de 2025

Fdo. Dña. Carmen García Franco

Fdo. D. Álvaro Zubizarreta Macho