

Comparación in vitro de la desviación angular y lineal en implantes dentales colocados a mano alzada y mediante dos flujos de cirugía guiada

Andrés Portilla Suárez, César Augusto Ortiz Prada

Trabajo de grado para optar el título de Especialista en Periodoncia

Director

Mario Andrés Guerrero Torres

Especialista en Periodoncia

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División Ciencias de Salud

Especialización en Periodoncia

2026

Dedicatoria

Dedicamos este logro, fruto de años de esfuerzo, disciplina y perseverancia, a Dios, por brindarnos la fortaleza, la sabiduría y la oportunidad de culminar esta importante etapa de nuestra formación profesional.

Finalmente, dedicamos este trabajo a todos aquellos pacientes que, con su confianza, nos recuerdan cada día el verdadero propósito de nuestra profesión: contribuir al bienestar y la salud de las personas mediante una práctica clínica basada en la excelencia, la ética y el compromiso humano.

A mi madre (Yaneth Suárez) quien con su templanza y ejemplo me enseñó que los sueños se construyen con sacrificio, constancia y amor. Cada página de este trabajo refleja los valores que sembró en mí y que me permitieron llegar hasta aquí.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecemos a Dios por brindarnos salud, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de recorrer este camino, permitiéndonos superar cada desafío y aprender de cada experiencia vivida durante nuestra formación.

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Dr. Mario Guerrero y Dra. Claudia Becerra, por su guía experticia, paciencia y constante apoyo durante todo el proceso investigativo; a los miembros del comité por sus valiosas observaciones y críticas constructivas que enriquecieron este trabajo; a la Universidad Santo Tomás y facultad de Periodoncia por facilitar los recursos y el espacio académico necesarios; a mi colega por su colaboración y constante trabajo en equipo; y, de manera especial.

A nuestras familias, por su amor incondicional, apoyo constante y confianza inquebrantable. Gracias por acompañarnos en cada paso, por comprender los momentos de ausencia, por ofrecer palabras de aliento en los días difíciles y por celebrar con nosotros cada avance alcanzado. Su respaldo ha sido el pilar fundamental que sostuvo este sueño.

A nuestros docentes, mentores y directores académicos, por compartir generosamente sus conocimientos, experiencia y pasión por la Periodoncia. Gracias por su orientación, exigencia académica y compromiso con la formación de profesionales íntegros y comprometidos con la excelencia clínica y científica.

A nuestros compañeros y amigos, quienes hicieron de este proceso una experiencia enriquecedora, llena de aprendizajes, colaboración y apoyo mutuo. Compartir este camino con ustedes hizo que cada reto fuera más llevadero y cada logro más significativo.

Contenido

1. Introducción	14
1.1 Planteamiento del problema	16
1.2 Justificación	19
2. Marco teórico	21
2.1 Cirugía guiada y guías quirúrgicas	21
2.1.1 Importancia del uso de guías quirúrgicas en la colocación de implantes	23
2.1.2 Ventajas de usar guías quirúrgicas	24
2.1.3 Tipos de guías quirúrgicas	24
2.1.4 Cómo se planifican, diseñan y fabrican las guías quirúrgicas	25
2.2 Factores que afectan la precisión en la colocación de implantes con guía quirúrgica	26
2.2.1 Calidad de la guía	26
2.2.2 Métodos de evaluación de la precisión	26
2.2.3 Importancia de la tomografía axial en la evaluación	28
2.2.5 Material de los implantes	29
3. Objetivos	29
3.1 General	30
3.2 Objetivos específicos	30
4. Materiales y métodos	30
4.1 Tipo de estudio	30
4.2 Selección y descripción de participantes	31
4.2.1 Población	31
4.2.2 Muestra y tipo de muestreo	31

4.3 Criterios de Selección.....	32
4.3.1 Criterios de inclusión.....	32
4.3.2Criterios de exclusión	33
4.4 Variables.....	33
4.5 Instrumento.....	34
4.6 Procedimiento.....	35
4.6.1 Selección de tomografías y segmentación inicial.....	35
4.6.2 Planificación digital del implante	35
4.6.3 Diseño de las guías quirúrgicas	36
4.6.4 Fabricación de modelos experimentales.....	37
4.6.5 Fabricación de las guías quirúrgicas.....	37
4.6.6 Distribución de los grupos experimentales.....	38
4.6.7 Colocación de los implantes	38
4.6.8 Adquisición tomográfica posoperatoria	39
4.6.9 Segmentación y aislamiento de los implantes colocados	39
4.6.10 Registro tridimensional y análisis geométrico.....	40
4.6.11 Medición de las desviaciones	40
4.7. Plan de análisis estadístico	41
4.8 Control de sesgo	41
4.9 Consideraciones éticas	42
5. Resultados	43
5.1 Descripción de la muestra experimental	43
5.2 Análisis descriptivo de las desviaciones	43

5.3 Comparación estadística entre modalidades	45
5.4 Síntesis de los hallazgos.....	46
6. Discusión.....	46
7. Conclusiones.....	58
7.1 Recomendaciones.....	59
Referencias.....	60
Apéndices.....	63

Lista de tablas

Tabla 1. *Desviación coronal, apical y angular según modalidad de colocación implantaria* 44

Tabla 2. *Comparaciones post hoc de la desviación coronal, apical y angular entre modalidades experimentales* 46

Lista de figuras

Figura 1. <i>Flujograma de trabajo digital</i>	36
Figura 2. <i>Comparación de las desviaciones lineales coronal y apical entre modalidades experimentales</i>	44
Figura 3. <i>Comparación de la desviación angular entre modalidades experimentales</i>	45

Lista de apéndices

Apéndice A. *Cuadro de operacionalización de variables*

Apéndice B. *Instrumento*

Apéndice C. *plan de analisis estadistico de los datos univariado*

Apéndice D. *plan de analisis estadistico de los datos bivariado*

Resumen

Introducción: La colocación precisa de los implantes dentales es fundamental para favorecer resultados protésicos, funcionales y biológicos predecibles, así como para reducir el riesgo de complicaciones asociadas a una posición implantaria inadecuada. **Objetivo:** comparar desviación angular, lineal coronal y apical de implantes dentales colocados mediante técnica a mano alzada y mediante dos flujos de cirugía guiada, utilizando como referencia planificación digital inicial en un modelo experimental in vitro. **Materiales y métodos:** estudio experimental in vitro con 24 colocaciones implantarias distribuidas en tres grupos: colocación a mano alzada (IMA), cirugía guiada flujo no específico (IG-NS) y cirugía guiada flujo dental específico (IG-DS), ocho implantes por grupo. Con tomografías CBCT se realizó la segmentación tridimensional, planificación virtual, fabricación de modelos impresos en 3D, diseño de guías quirúrgicas restrictivas y colocación de los implantes. **Resultados:** La técnica a mano alzada presentó las mayores desviaciones promedio en las tres variables evaluadas. La desviación coronal fue de $1,738 \pm 0,342$ mm para IMA, $0,375 \pm 0,225$ mm para IG-NS y $0,400 \pm 0,193$ mm para IG-DS. La desviación apical fue de $1,812 \pm 0,344$ mm, $0,575 \pm 0,249$ mm y $0,537 \pm 0,220$ mm, respectivamente. La desviación angular fue de $8,691 \pm 1,522^\circ$ para IMA, $3,038 \pm 0,501^\circ$ para IG-NS y $3,100 \pm 0,441^\circ$ para IG-DS. **Conclusiones:** la cirugía guiada redujo la desviación lineal y angular frente a la colocación a mano alzada. No obstante, bajo las condiciones experimentales evaluadas, el flujo dental específico no mostró superioridad estadísticamente significativa frente al flujo no específico.

Palabras clave: implantes dentales, planificación quirúrgica, precisión, cirugía guiada, CBCT, estudio in vitro, Odontología digital, Impresión tridimensional, implantología

Abstract

Introduction: Accurate dental implant placement is essential to achieve predictable prosthetic, functional, and biological outcomes, as well as to reduce the risk of complications associated with improper implant positioning. **Objective:** To compare the angular, coronal linear, and apical linear deviations of dental implants placed using the freehand technique and two guided surgery workflows, taking the initial digital planning as the reference in an in vitro experimental model. **Materials and Methods:** An in vitro experimental study was conducted with 24 implant placements distributed into three groups: freehand placement (FHI), guided surgery using a non-specific workflow (GS-NS), and guided surgery using a dental-specific workflow (GS-DS), with eight implants per group. CBCT scans were used for three-dimensional segmentation, virtual planning, fabrication of 3D-printed models, design of restrictive surgical guides, and implant placement. **Results:** The freehand technique showed the highest mean deviations for all three variables evaluated. Coronal deviation was 1.738 ± 0.342 mm for FHI, 0.375 ± 0.225 mm for GS-NS, and 0.400 ± 0.193 mm for GS-DS. Apical deviation was 1.812 ± 0.344 mm, 0.575 ± 0.249 mm, and 0.537 ± 0.220 mm, respectively. Angular deviation was $8.691 \pm 1.522^\circ$ for FHI, $3.038 \pm 0.501^\circ$ for GS-NS, and $3.100 \pm 0.441^\circ$ for GS-DS. **Conclusions:** Guided surgery reduced both linear and angular deviations compared with freehand implant placement. However, under the experimental conditions evaluated, the dental-specific workflow did not demonstrate statistically significant superiority over the non-specific workflow.

Keywords: dental implants, guided surgery, surgical planning, accuracy, CBCT, three-dimensional (3D) printing, accuracy, digital dentistry, in vitro study, implantology

Glosario

Implante dental: dispositivo biocompatible que se inserta en el hueso maxilar o mandibular para reemplazar la raíz de un diente ausente y soportar una restauración protésica (Romandini et al., 2023).

Cirugía guiada: procedimiento implantológico que utiliza planificación digital y guías quirúrgicas para transferir con precisión la posición planificada del implante al campo operatorio (Dioguardi et al., 2023).

Guía quirúrgica: dispositivo diseñado digitalmente que orienta la dirección, angulación y profundidad del fresado e inserción del implante (Dioguardi et al., 2023).

Planificación digital: proceso virtual mediante el cual se determina la posición ideal del implante utilizando imágenes tridimensionales y software especializado (Dioguardi et al., 2023).

CBCT (Tomografía Computarizada de Haz Cónico): método de diagnóstico por imágenes que permite obtener reconstrucciones tridimensionales de las estructuras maxilofaciales para la planificación implantológica (Markiewicz y Nowicki, 2025).

Desviación angular: diferencia expresada en grados entre el eje longitudinal del implante planificado y el eje del implante finalmente colocado (Søndergaard et al., 2021).

Desviación lineal coronal: distancia entre la posición coronal planificada del implante y la posición coronal obtenida después de su colocación (Søndergaard et al., 2021).

Desviación lineal apical: distancia entre la posición apical planificada del implante y la posición apical alcanzada tras la inserción implantaria (Raico Gallardo et al., 2017).

Exactitud implantaria: grado de concordancia entre la posición planificada digitalmente y la posición final alcanzada por el implante (Lou et al., 2021).

Segmentación tridimensional: proceso digital mediante el cual se aíslan estructuras anatómicas en imágenes tomográficas para generar modelos virtuales en tres dimensiones (Beyer et al., 2025).

Impresión 3D: tecnología de fabricación aditiva utilizada para producir modelos experimentales y guías quirúrgicas a partir de archivos digitales (Morón-Conejo et al., 2024).

Registro tridimensional: método de superposición y comparación de modelos digitales que permite evaluar diferencias entre la planificación inicial y el resultado final (Seidel et al., 2025).

Flujo digital: conjunto de procedimientos tecnológicos que integran adquisición de imágenes, planificación virtual, diseño asistido por computador, impresión 3D y análisis geométrico (Panjnoush et al., 2023).

1. Introducción

La terapia con implantes dentales se ha consolidado como una alternativa predecible para la rehabilitación de pacientes con ausencia de uno o más dientes, siempre que la posición tridimensional del implante favorezca condiciones biológicas, funcionales y protésicas adecuadas. (Jones, 2018; Lou et al., 2021).

Tradicionalmente, los implantes se han colocado mediante técnicas a mano alzada, dependientes de la habilidad del operador, siendo inherentemente susceptibles a desviaciones del plan preoperatorio (Lou et al., 2021; Markiewicz & Nowicki, 2025). En respuesta a estas limitaciones, las guías quirúrgicas se han incorporado progresivamente a la práctica clínica como herramientas para mejorar la transferencia de la planificación preoperatoria al acto quirúrgico. (Jones, 2018). Estas guías permiten al cirujano posicionar el implante en la ubicación planificada con más exactitud, reduciendo riesgos de error humano intraoperatorio que llevan a una menor predictibilidad y reproducibilidad, lo que puede derivar en complicaciones como daños a estructuras anatómicas vitales (Jones, 2018; Lou et al., 2021; Markiewicz & Nowicki, 2025).

En implantología, la precisión en la posición final del implante es un componente clave para el éxito del tratamiento restaurativo, ya que la osteointegración no es el único factor importante a considerar (Jones, 2018). La mala posición del implante conlleva a pérdida del tejido blando y hueso periimplantario, desarrollando enfermedad periimplantaria y cambios estéticos significativos, además de una rehabilitación más desafiante (Jones, 2018; Lou et al., 2021). La cirugía guiada permite preplanificar las necesidades protésicas del paciente y colocar los implantes combinando condiciones protésicas y biológicas (Jones, 2018), con la aplicación de la tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), escaneos digitales de superficie (lenguaje de teselación estándar, STL) y el diseño/fabricación asistida por CAD/CAM (Lou et al., 2021; Markiewicz &

Nowicki, 2025). Sin embargo, el principal desafío está en transferir con precisión la planificación 3D del implante desde el computador a la cavidad oral del paciente (Jones, 2018).

En este contexto, existen tres tipos de guías quirúrgicas digitales: osteosoportadas, mucosoportadas y dentoportadas (Lou et al., 2021). Estas guías pueden ser parcialmente guiadas (perforación guiada) o totalmente guiadas (perforación guiada y anillo guía del implante) (Lou et al., 2021). La evidencia muestra que la colocación de implantes totalmente guiada presenta una menor variación en la desviación del implante en comparación con una parcialmente guiada (Lou et al., 2021). Así mismo sugiere que las guías dentoportadas generalmente ofrecen la mayor precisión debido a su fijación rígida, en comparación con las mucosoportadas debido a la movilidad tisular (Markiewicz & Nowicki, 2025).

Al comparar la posición planificada del implante con la posición finalmente obtenida, se han reportado desviaciones lineales cercanas a 0,5–1 mm en la porción cervical y desviaciones angulares aproximadas entre 1° y 5°, dependiendo del flujo de trabajo, el tipo de guía y el método de evaluación empleado (Adams et al., 2023). Sin embargo, la implementación de la cirugía guiada estricta también puede verse limitada por la necesidad de componentes específicos, como casquillos o anillos metálicos compatibles con las fresas y adaptadores del sistema utilizado. (Adams et al., 2023).

Además de las diferencias asociadas al tipo de guía y al grado de restricción quirúrgica, la exactitud de la cirugía guiada también puede estar condicionada por el flujo tecnológico utilizado para su fabricación. La impresora, la resina, el software de laminado, la orientación de impresión, el lavado, el postcurado y la estabilidad dimensional final de la guía pueden influir en el ajuste del dispositivo y, en consecuencia, en la transferencia de la planificación digital al modelo físico o al lecho quirúrgico. Por esta razón, la comparación entre una guía fabricada mediante un flujo no

específico y una guía elaborada mediante un flujo dental específico permite analizar no solo la utilidad de la cirugía guiada frente a la colocación a mano alzada, sino también la posible influencia del proceso de fabricación sobre la desviación angular y lineal del implante.

Por lo anterior, el problema no se limita a determinar si la cirugía guiada es “mejor” que la colocación a mano alzada, sino establecer cuánta exactitud se gana y qué tan consistente es esa ganancia cuando el flujo guiado se ejecuta con diferentes condiciones tecnológicas.

En este contexto, un diseño *in vitro* permite controlar variables clínicas externas y concentrar el análisis en mediciones tridimensionales objetivas de desviación angular y lineal, comparando de forma reproducible la planificación digital con la posición final alcanzada.

Con base en este enfoque, el presente estudio se estructura alrededor de modelos impresos en 3D derivados de planificaciones tomográficas, comparando la exactitud de la colocación de implantes en tres condiciones: (1) técnica a mano alzada; (2) cirugía completamente guiada mediante guía en resina fabricada con un flujo de impresión no específico; y (3) cirugía completamente guiada mediante guía en resina fabricada con un flujo de impresión específico. En todos los casos, la planificación virtual se considera el patrón de referencia, y la comparación se realiza mediante registro tridimensional y cuantificación de desviaciones entre el implante planificado y el implante finalmente colocado, aportando evidencia aplicable a la discusión clínica y operativa sobre precisión, estandarización y factibilidad del flujo digital en implantología.

1.1 Planteamiento del problema

En la práctica clínica, la colocación de implantes dentales a mano alzada continúa siendo una técnica ampliamente utilizada; sin embargo, su exactitud depende en gran medida de la experiencia del operador, la visibilidad del campo quirúrgico, el acceso anatómico, la

interpretación de las ayudas diagnósticas y la capacidad de reproducir intraoperatoriamente la posición previamente planificada. Esta dependencia del juicio clínico y de la habilidad manual puede generar variaciones entre la posición ideal del implante y la posición finalmente alcanzada, lo cual resulta especialmente relevante cuando se consideran la proximidad a estructuras anatómicas críticas, la emergencia protésica, la distribución biomecánica de las cargas y la estabilidad de los tejidos periimplantarios (Bhalerao et al., 2023; Raico Gallardo et al., 2017).

Frente a estas limitaciones, la cirugía guiada ha surgido como una estrategia para mejorar la transferencia de la planificación digital al acto quirúrgico, mediante el uso de dispositivos diseñados a partir de información tomográfica, modelos tridimensionales y herramientas CAD/CAM. En particular, las guías quirúrgicas restrictivas buscan controlar la dirección, la angulación y, en algunos casos, la profundidad del fresado y de la inserción implantaria. No obstante, la cirugía guiada no elimina por completo la posibilidad de desviación, ya que su exactitud depende de una cadena de procesos técnicos susceptibles a error, entre ellos la adquisición de imágenes, la segmentación, la planificación virtual, el diseño de la guía, la fabricación, el postprocesado, el ajuste sobre el modelo o el paciente y la estabilidad del dispositivo durante la preparación del lecho implantario (Raico Gallardo et al., 2017).

A pesar del avance de los flujos digitales en implantología, la evidencia disponible aún presenta desafíos para su interpretación y aplicación clínica. La cirugía guiada suele analizarse como una categoría general frente a la colocación a mano alzada, pero en la práctica no constituye una tecnología única ni homogénea. Por el contrario, puede ejecutarse mediante diferentes combinaciones de software, impresoras, resinas, parámetros de impresión, protocolos de lavado, postcurado y sistemas de fresado. Estas variaciones pueden modificar la estabilidad dimensional

de la guía, su ajuste y su capacidad para transferir fielmente la planificación digital a la posición final del implante (Banerjee et al., 2025).

En este sentido, la comparación entre cirugía guiada y colocación a mano alzada resulta insuficiente cuando se busca comprender la magnitud real de la desviación implantaria en escenarios más cercanos a la práctica académica y clínica cotidiana. Además de establecer si la cirugía guiada mejora la exactitud frente a la técnica convencional, es necesario analizar si diferentes flujos de fabricación de guías quirúrgicas pueden generar resultados similares o si, por el contrario, producen variaciones clínicamente relevantes en la desviación angular y lineal del implante. Esta pregunta adquiere especial importancia en contextos donde la adopción de tecnologías digitales específicas puede estar limitada por costos, disponibilidad de equipos, insumos, entrenamiento técnico y acceso a sistemas certificados para uso odontológico. (Banerjee et al., 2025; Søndergaard et al., 2021). Por lo tanto, el problema no se limita a determinar si la cirugía guiada es más exacta que la colocación a mano alzada, sino a establecer si la exactitud obtenida varía cuando se comparan diferentes flujos de cirugía guiada. En este marco, un diseño experimental in vitro permite controlar variables clínicas externas y concentrar el análisis en mediciones tridimensionales objetivas, comparando la posición planificada digitalmente con la posición final alcanzada por el implante. Este enfoque posibilita cuantificar la desviación angular, la desviación lineal coronal y la desviación lineal apical en condiciones estandarizadas. (Søndergaard et al., 2021). Con base en lo anterior, el presente estudio se orienta a comparar la exactitud de la colocación de implantes dentales en tres modalidades experimentales: colocación a mano alzada, cirugía guiada mediante un flujo de fabricación no específico y cirugía guiada mediante un flujo de fabricación dental específico. La planificación digital inicial se asumirá como patrón de referencia, y la posición final del implante será evaluada mediante registro

tridimensional y medición de las desviaciones entre el implante planificado y el implante colocado.

A partir de este enfoque, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Existen diferencias en la exactitud de la posición final del implante dental, expresada como desviación angular, desviación lineal coronal y desviación lineal apical respecto a la planificación digital inicial, entre la colocación a mano alzada, la cirugía guiada mediante un flujo de fabricación no específico y la cirugía guiada mediante un flujo de fabricación dental específico, en un modelo experimental in vitro basado en CBCT, impresión 3D y registro tridimensional?

1.2 Justificación

La colocación de implantes dentales exige un alto nivel de exactitud tridimensional para favorecer una adecuada posición protésica, preservar estructuras anatómicas críticas, optimizar la distribución biomecánica de las cargas y mantener la estabilidad de los tejidos periimplantarios. Aunque la planificación digital mediante tomografía computarizada de haz cónico, segmentación tridimensional y software especializado ha permitido mejorar la visualización anatómica y la toma de decisiones preoperatorias, la predictibilidad del procedimiento depende de la capacidad de transferir fielmente dicha planificación a la posición final del implante. En consecuencia, la medición de la desviación entre el implante planificado y el implante colocado constituye un criterio objetivo para valorar la exactitud del procedimiento y sustentar decisiones clínicas basadas en evidencia (Dioguardi et al., 2023a; Søndergaard et al., 2021).

La cirugía guiada se ha propuesto como una alternativa para reducir la variabilidad asociada a la colocación a mano alzada, especialmente al controlar la trayectoria de fresado y facilitar la reproducción de la posición planificada. No obstante, su exactitud no depende

únicamente del diseño virtual de la guía, sino de una cadena de procesos técnicos que incluye la calidad de la imagen tomográfica, la segmentación, la planificación digital, el diseño de la guía, el tipo de impresora, la resina utilizada, los parámetros de impresión, el lavado, el postcurado, el ajuste del dispositivo y su estabilidad durante el procedimiento. Por esta razón, la cirugía guiada no debe entenderse como una técnica homogénea, sino como un flujo de trabajo susceptible a variaciones que pueden influir en la desviación final del implante (Søndergaard et al., 2021).

Desde esta perspectiva, resulta insuficiente comparar de manera general la colocación a mano alzada con la cirugía guiada sin considerar las condiciones tecnológicas bajo las cuales se fabrica la guía quirúrgica. En escenarios académicos y clínicos reales, la disponibilidad de equipos, materiales y sistemas específicos para odontología puede estar limitada por factores económicos, logísticos o de acceso tecnológico. Por ello, comparar un flujo de cirugía guiada no específico con un flujo dental específico permite generar información relevante sobre la posible influencia del proceso de fabricación en la exactitud implantaria, así como sobre la factibilidad de implementar alternativas de menor complejidad tecnológica en contextos controlados. (Dioguardi et al., 2023a).

El presente estudio se justifica porque propone una comparación in vitro de tres modalidades de colocación implantaria: técnica a mano alzada, cirugía guiada mediante un flujo de fabricación no específico y cirugía guiada mediante un flujo dental específico. Al utilizar modelos impresos en 3D derivados de planificación tomográfica, se controlan variables clínicas externas y se posibilita una evaluación reproducible de la desviación angular, la desviación lineal coronal y la desviación lineal apical respecto a la planificación digital inicial. Esta aproximación permite aislar con mayor claridad el efecto de la modalidad de colocación y del flujo de fabricación de la guía sobre la exactitud obtenida.

En términos académicos y clínicos, los resultados de esta investigación pueden aportar evidencia útil para establecer la magnitud de la desviación asociada a cada modalidad, identificar si un flujo guiado no específico logra aproximarse a la exactitud de un flujo dental específico y orientar criterios técnicos para la selección, fabricación y control de calidad de guías quirúrgicas en implantología. De este modo, el estudio contribuye a fortalecer la toma de decisiones en implantología digital, optimizar la predictibilidad de los procedimientos y promover futuras investigaciones sobre estandarización de flujos de trabajo en cirugía guiada. (Romandini et al., 2023).

2. Marco teórico

2.1 Cirugía guiada y guías quirúrgicas

El término "cirugía guiada" en implantología dental puede definirse como un flujo de trabajo digital que comienza con la adquisición de datos sobre la futura prótesis del paciente, continúa con un software de diseño y planificación tridimensional, y finaliza la elaboración de un dispositivo estereolitográfico que va a transferir la posición preplanificada de los implantes, al lecho quirúrgico (Raico Gallardo et al., 2017). El avance tecnológico permite diferentes métodos según el enfoque, puede ser dinámico que utilizan sistemas de navegación en tiempo real para rastrear la posición y el movimiento de los instrumentos quirúrgicos, especialmente en cirugía de implantes cigomáticos los cuales prometen una colocación similar a la posición preoperatoria planificada (Bhalerao et al., 2023), proporcionando resultados precisos y confiables en comparación con las técnicas a mano alzada (Banerjee et al., 2025).

En caso de complicaciones intraoperatorias inesperadas como la fractura de la guía, o el fallo de la red o el software de navegación, limitaciones como la apertura bucal, los costos y la disponibilidad de los equipos, pueden imposibilitar la cirugía guiada. En tales circunstancias, el operador debe poder confiar en su destreza manual y su visualización (Carrico et al., 2024). Si bien la precisión de la colocación de implantes a mano alzada puede ser suficiente, en la mayoría de las situaciones clínicas puede representar un desafío para un operador sin experiencia (Carrico et al., 2024; Raico Gallardo et al., 2017).

La precisión de la colocación de implantes se mide mediante las desviaciones de la distancia de entrada, las desviaciones de la distancia apical y la desviación angular entre la posición planificada y la posición del implante (Carrico et al., 2024, Raico Gallardo et al., 2017)). Tres tipos de tejido pueden soportar las guías quirúrgicas estereolitográficas: hueso, mucosa y diente (Raico Gallardo et al., 2017).

Las guías con soporte óseo fueron las primeras guías utilizadas en pacientes completamente edéntulos, la principal ventaja de estas guías es la amplia visualización del campo quirúrgico, sin embargo, la técnica quirúrgica requiere la apertura de un colgajo para acceder al hueso, lo que provoca mayor pérdida de la cresta ósea alveolar debido a la disminución vascular (Raico Gallardo et al., 2017).

Para superar las limitaciones de las guías osteosoportadas, se introdujo la técnica mínimamente invasiva sin colgajo que reduce la morbilidad al paciente, sin embargo, la estabilidad y precisión de las guías mucosoportadas depende de la resiliencia del tejido blando y de uso de tornillos de fijación (Raico Gallardo et al., 2017).

Banerjee et al., (2025), realizaron un estudio comparativo de las diferentes técnicas (dinámica, estática, mano alzada) donde reportaron que las desviaciones de la plataforma oscilaron

entre 0,64 mm y 1,73 mm para la cirugía de implantes guiada dinámicamente, 0,97 mm y 2,34 mm para la cirugía de implantes guiada estricta y 1,42 mm y 3,48 mm para la cirugía de implantes a mano alzada.

En el mismo estudio reportan que las desviaciones angulares oscilaron entre 2,49° y 5,75° en la cirugía de implantes con guía dinámica, 2,2° y 4,98° en la cirugía de implantes con guía estricta y 3,5° y 10,09° en la cirugía de implantes con mano alzada.

En el caso de las desviaciones apicales variaron de 0,89 mm a 1,86 mm en la cirugía de implantes guiada dinámicamente, de 1,28 mm a 2,53 mm en la cirugía de implantes guiada estricta, y de 2,19 mm a 3,60 mm en la cirugía de implantes a mano alzada (Banerjee et al., 2025).

2.1.1 Importancia del uso de guías quirúrgicas en la colocación de implantes

La precisión de los implantes es de gran importancia debido a factores fundamentales. Al utilizar guías estrictas fabricadas con CAD/CAM, se pueden obtener resultados predecibles desde el primer intento (Carrico et al., 2024). Para empezar, los casos que requieren múltiples implantes para una prótesis parcial fija (FPD) son más complejos, ya que las desviaciones se ven agravadas por la dependencia de las posiciones de los implantes entre sí, y los implantes deben colocarse en los ángulos correctos y con la separación óptima para obtener un resultado restaurador adecuado (Carrico et al., 2024), ya que se reducen los movimientos perjudiciales que interrumpen el proceso de cicatrización y hacen que no se desarrolle adecuadamente el hueso periimplantar, proporcionando a un operador sin experiencia apoyo adicional a medida que adquiere habilidad y confianza. (Carrico et al., 2024; Raico Gallardo et al., 2017).

También se deben tener en cuenta las estructuras anatómicas limitantes como nervios, arterias y senos maxilares, teniendo presente que al poner un implante con precisión, se evita dañar

alguna de estas estructuras donde se podría producir dolor crónico, parestesia y pérdida de tono muscular, infecciones o la necesidad de realizar más intervenciones complejas para corregir estos problemas (Carrico, et al., 2024; Raico, et al., 2017).

2.1.2 Ventajas de usar guías quirúrgicas

Los beneficios de la cirugía de implantes guiada por computador son una mejor planificación preoperatoria, ya que permite a los médicos colocar implantes virtuales y evaluar las estructuras anatómicas. El uso de guías mejora la precisión quirúrgica al facilitar la colocación, el ángulo y la profundidad ideales del implante, lo que proporciona mejores resultados estéticos y funcionales, reduciendo la probabilidad de problemas intraoperatorios, aumentando la longevidad del tratamiento (Banerjee et al., 2025; Bhalerao et al., 2023).

En cuanto a los tiempos de acto quirúrgico, se reducen considerablemente ya que se evita realizar ajustes o correcciones del curso del fresado durante el procedimiento, lo que también significa una menor cantidad de anestésico usado durante la cirugía. (Feng et al., 2022).

2.1.3 Tipos de guías quirúrgicas

Las guías quirúrgicas para implantes dentales se clasifican de acuerdo con su grado de restricción y con la técnica empleada para su fabricación. En cuanto al grado de restricción, existen tres categorías principales: 1. Las guías no restrictivas señalan la posición de los implantes en relación con la prótesis, pero no controlan la dirección ni la profundidad del fresado, lo que puede generar errores de angulación y comprometer estructuras anatómicas críticas. 2. Las guías semirrestrictivas incorporan un tubo guía para la fresa inicial; sin embargo, el cirujano debe continuar la preparación a mano alzada, lo que también puede derivar en complicaciones. 3. Las

guías restrictivas limitan las posiciones vestibular o lingual y cuentan con topes de profundidad, lo que asegura preparaciones más precisas y alineadas con la planificación preoperatoria (Søndergaard et al., 2021).

Respecto a la técnica de fabricación, se distinguen dos modalidades principales: La guía clásica o de laboratorio se obtiene a partir del duplicado de encerados o enfilados diagnósticos, o mediante el uso de prótesis preexistentes con marcadores radiopacos. La 2 modalidad es la guía diseñada por computador (CAD-CAM), la cual se fabrica utilizando tecnología digital, lo que permite alcanzar un ajuste superior y una mayor precisión en la transferencia de la planificación al campo operatorio (Dioguardi et al., 2023a; Søndergaard et al., 2021).

2.1.4 Cómo se planifican, diseñan y fabrican las guías quirúrgicas

La fabricación de guías quirúrgicas a la hora de colocar implantes ha sido respaldada por la evidencia científica como medio para aumentar la precisión y predictibilidad del tratamiento para finalmente garantizar su duración en el tiempo. Dentro de los estudios científicos se encuentran estudios clínicos y revisiones sistemáticas donde se demuestra que se logran reducir desviaciones angulares y lineales de los implantes puestos. Estas guías se basan en un diseño digital que integra sats tomográficos y modelos tridimensionales donde se planifica la guía con el fin de predecir también la parte protésica del paciente (Dioguardi et al., 2023a; Søndergaard et al., 2021).

Para la elaboración de la guía se requiere una evaluación del paciente, así como el uso de ayudas diagnósticas. Después de esto, las imágenes diagnósticas se convierten en modelos 3D ya sea del maxilar o de la mandíbula y con ayuda de un software se colocan los implantes virtualmente, evitando las zonas de peligro como estructuras anatómicas y arterias, todo esto considerando la cantidad y calidad del hueso presente (Jones, 2018),

Una vez realizado lo mencionado, se diseña la guía usando el diseño asistido por computador, este diseño va a tener orificios y canales guía para el fresado preciso del sitio de los implantes. También, dependiendo del tipo de guía si es estricta o no se añaden restricciones angulares o toques de profundidad para garantizar aún más la precisión del fresado. (Jones, 2018).

2.2 Factores que afectan la precisión en la colocación de implantes con guía quirúrgica

2.2.1 Calidad de la guía

Como se menciona anteriormente, dichos orificios y canales tendrán anillos internos personalizados para guiar la broca de fresado y debido a que la guía se imprime desde un modelo 3D generado por un software, es necesaria la precisión del modelado para que la guía quede ajustada al paciente a la hora de imprimirla, en esto afecta también la calidad de la impresora y la calidad del material, ya que de ello va a depender que se obtenga la guía definitiva (Carrico et al., 2024).

Ya que la guía quirúrgica está hecha a base de imágenes diagnósticas como modelos 3D y tomografías, es importante que estas tengan precisión absoluta de las estructuras dentales y anatómicas del paciente para que así se pueda tener una guía fiel a las estructuras del paciente, ya que las imágenes distorsionadas o con poca calidad afectarían el acople de la guía en el paciente (Carrico et al., 2024).

2.2.2 Métodos de evaluación de la precisión

Para evaluar la precisión de dicha guía se utilizan métodos tridimensionales donde se compara la posición planificada en el software usado, con la posición final del implante dentro del maxilar en postoperatorio. Uno de los métodos más usados es la superposición de imágenes que se obtienen de tomografías que se realizan de manera prequirúrgica y postquirúrgica junto con los modelos 3D del paciente donde se miden las desviaciones angulares y lineales en el punto de entrada del implante y en su porción apical. Dentro de los estudios clínicos y experimentales se reportan un promedio de desviación en el punto de entrada de 0.8mm a 1.5mm y de 1.0mm a 2.0mm en su porción apical. Así como una desviación angular de entre 2 y 6 grados dependiendo del tipo guía que se usó (Feng et al., 2022; Carrico et al., 2024)).

Es por eso que existen diversas maneras de realizar un diagnóstico en 3D y una planificación mediante una guía quirúrgica, la tomografía axial computarizada (TAC) y la tomografía computarizada de haz cónico. Ambas permiten una visión dinámica de las estructuras de los maxilares, lo cual permite que la colocación virtual del implante puede planificarse en función de los objetivos de la restauración y el sitio donde se va a colocar. El panorama actual de la implantología ha presentado un aumento del interés por la cirugía guiada sin colgajo, lo que ha dado lugar a numerosas investigaciones sobre su eficacia y seguridad a largo plazo. Aunque algunos autores han puesto en duda la superioridad de los procedimientos asistidos por software sobre la cirugía convencional en términos de seguridad, resultados y eficiencia, la literatura reciente subraya un creciente conjunto de pruebas que respaldan su viabilidad (Feng et al., 2022).

Se han realizado varias revisiones para evaluar la precisión de la cirugía guiada sin colgajo. En particular, Voulgarakis et al. (2014), Lin et al. (2014) y Moraschini et al. (2015) han coincidido en que las tasas de supervivencia de los implantes realizados con cirugía guiada oscilan entre el 89% y el 100% en periodos de seguimiento relativamente cortos que abarcan de 6 a 48 meses. Un

estudio especialmente notable de Velasco-Ortega et al. mostró una tasa de supervivencia acumulada del 97,5 % en 198 implantes en la mandíbula de pacientes geriátricos, a pesar de haber sufrido un número mínimo de pérdidas de implantes y complicaciones postoperatorias, predominantemente periimplantitis y problemas mecánicos. Las investigaciones posteriores de Velasco-Ortega et al. reafirmaron estos hallazgos, demostrando una tasa de supervivencia del 100% entre los implantes con sobredentaduras protésicas tras un periodo medio de seguimiento de 44 meses. En conjunto, estos resultados sugieren que la cirugía sin colgajo guiada ofrece resultados comparables a los procedimientos tradicionales a mano alzada en cuanto a tasas de supervivencia, remodelación ósea marginal y supervivencia periimplantaria. (Feng et al., 2022)

2.2.3 Importancia de la tomografía axial en la evaluación

La combinación de una tomografía computarizada de haz cónico (CBCT), un escaneo digital de superficie y un software de planificación de implantes permite al clínico incorporar con precisión información de estructuras anatómicas importantes y visualizar la futura prótesis preoperatoriamente (Feng et al., 2022; Jones, 2018).

La introducción de la tomografía computarizada (TC) en implantología dental, incluyendo la TC de haz cónico (CBCT) y la TC multicorte (MSCT), ha mejorado los resultados del tratamiento con implantes dentales al permitir el análisis tridimensional de la geometría ósea para la planificación prequirúrgica de la colocación de los implantes (Bhalerao et al., 2023) Después de la colocación de implantes, la radiografía periapical y la CBCT son herramientas importantes para el seguimiento postoperatorio y la evaluación a largo plazo del implante. Estas imágenes permiten al odontólogo evaluar la integración del implante con el hueso circundante, detectar signos de mala cicatrización como la pérdida ósea periimplantaria (Søndergaard et al., 2021).

2.2.5 Material de los implantes

Los implantes están hechos de materiales como Titanio (cp-Ti, grados I–IV) que es el material más común con el que se fabrican debido a su segura biocompatibilidad con el cuerpo humano, también se usan aleaciones de titanio donde la mas usada es Ti-6Al-4V debido a que tiene mayor resistencia a la corrosión y tiene la capacidad de crear una capa de oxido estable y esto favorece la osteointegración con tasas de éxito de entre 90% y 95% en el tiempo. El titanio se integra con el hueso en un proceso que se conoce como osteointegración lo que le da al implante una base estable. Este material usado en implantes puede ser en aleaciones de titanio con algún otro metal o completamente puro. La zirconia (dióxido de circonio estabilizado con itrio) también se usa en implantología sobre todo en casos donde la estética es importante, esto en pacientes con un periodonto delgado y con riesgo de exposición de roscas, es biocompatible y también muy resistente a la corrosión. Por otro lado, se encuentran las aleaciones de circonio con titanio que sirven para mejorar la biomecánica y la estética. Cada uno de estos materiales proporciona una confiabilidad y precisión que beneficia a los pacientes a largo plazo (Søndergaard et al., 2021).

Estas últimas aleaciones usadas entre circonio y titanio en ocasiones también pueden ser combinadas con recubrimiento bioactivos como la hidroxiapatita, óxidos de titanio, fosfatos de calcio y algunos biomateriales híbridos. La selección del material influye sobre la estabilidad primaria del implante, respuesta biológica periimplantaria y supervivencia del implante en el largo plazo. Esta es un área que continúa siendo objeto de desarrollo y activa investigación (Søndergaard et al., 2021).

3. Objetivos

3.1 General

Comparar la desviación angular, lineal coronal y lineal apical en implantes dentales colocados a mano alzada y mediante dos flujos de cirugía guiada, utilizando como referencia la planificación digital inicial en un modelo experimental in vitro.

3.2 Objetivos específicos

1. Cuantificar la desviación angular entre el implante planificado digitalmente y el implante colocado en cada una de las tres modalidades evaluadas: colocación a mano alzada, cirugía guiada mediante flujo no específico y cirugía guiada mediante flujo dental específico.
2. Cuantificar la desviación lineal coronal y apical entre el implante planificado digitalmente y el implante colocado en cada una de las tres modalidades evaluadas.
3. Comparar las desviaciones angulares y lineales obtenidas entre las tres modalidades de colocación implantaria, con el fin de identificar cuál presenta menor desviación respecto a la planificación digital inicial.

4. Materiales y métodos

4.1 Tipo de estudio

Se realizó un estudio experimental in vitro de comparación de exactitud en la colocación de implantes dentales. La exactitud se entendió como el grado de concordancia entre la posición planificada digitalmente del implante y la posición final obtenida después de su inserción, cuantificada mediante desviación angular, desviación lineal coronal y desviación lineal apical.

El enfoque experimental in vitro permitió controlar variables clínicas externas y centrar el análisis en mediciones tridimensionales objetivas derivadas del registro entre la planificación digital inicial y el resultado posoperatorio obtenido en los modelos experimentales.

4.2 Selección y descripción de participantes

Debido a la naturaleza in vitro del estudio, no se incluyeron participantes humanos sometidos a intervención clínica. La investigación se desarrolló a partir de tomografías computarizadas de haz cónico de archivo, previamente anonimizadas, utilizadas para la segmentación, planificación digital, diseño de guías quirúrgicas y fabricación de modelos físicos mediante impresión 3D.

Las imágenes tomográficas fueron empleadas exclusivamente como insumo para la reconstrucción tridimensional de los modelos experimentales y para la planificación virtual de la posición ideal de los implantes.

4.2.1 Población

La población estuvo conformada por modelos experimentales impresos en 3D derivados de tomografías CBCT de archivo, aptas para segmentación, planificación digital estandarizada y simulación de colocación implantaria.

La unidad de análisis correspondió a cada implante dental colocado en el modelo experimental y comparado con su posición planificada digitalmente.

4.2.2 Muestra y tipo de muestreo

La muestra se seleccionó por conveniencia y estuvo conformada por 24 colocaciones implantarias, distribuidas en tres grupos experimentales de ocho implantes cada uno:

Grupo IMA: implantes colocados mediante técnica a mano alzada.

Grupo IG-NS: implantes colocados mediante cirugía guiada con guía quirúrgica restrictiva fabricada a través de un flujo de impresión no específico para odontología.

Grupo IG-DS: implantes colocados mediante cirugía guiada con guía quirúrgica restrictiva fabricada a través de un flujo de impresión dental específico.

En todos los grupos, la planificación digital inicial fue considerada el patrón de referencia para comparar la posición final del implante colocado. La unidad de análisis correspondió a cada implante dental insertado en el modelo experimental y comparado con su posición planificada digitalmente.

4.3 Criterios de Selección

4.3.1 Criterios de inclusión

Se incluyeron tomografías CBCT de archivo que cumplieran con los siguientes criterios:

- Tomografías con calidad diagnóstica suficiente para permitir segmentación tridimensional reproducible.
- Archivos DICOM completos y aptos para reconstrucción volumétrica.
- Ausencia de artefactos severos que comprometieran la segmentación, planificación o registro tridimensional.
- Posibilidad de generar modelos digitales exportables en formato STL.

- Casos con volumen anatómico suficiente para la planificación estandarizada de los sitios implantarios.
- Modelos digitales compatibles con el diseño de guías quirúrgicas restrictivas.

4.3.2 Criterios de exclusión

Se excluyeron tomografías o modelos que presentaran alguna de las siguientes condiciones:

- Archivos DICOM incompletos, corruptos o con series faltantes.
- Artefactos severos por restauraciones metálicas u otros elementos que impidieran una segmentación confiable.
- Distorsiones que afectaran la reconstrucción tridimensional del modelo.
- Modelos STL defectuosos, no reparables o incompatibles con el proceso de impresión.
- Casos con limitaciones anatómicas que impidieran estandarizar la ubicación de los implantes.
- Modelos impresos o guías quirúrgicas con fallas de fabricación, deformación, fractura, ajuste deficiente o alteraciones dimensionales visibles.

4.4 Variables

La variable independiente del estudio fue la modalidad de colocación implantaria, definida en tres categorías:

1. Colocación a mano alzada.
2. Cirugía guiada mediante flujo no específico.
3. Cirugía guiada mediante flujo dental específico.

Las variables dependientes fueron:

1. Desviación angular: diferencia en grados entre el eje longitudinal del implante planificado y el eje longitudinal del implante colocado.
2. Desviación lineal coronal: distancia tridimensional en milímetros entre el centro coronal del implante planificado y el centro coronal del implante colocado.
3. Desviación lineal apical: distancia tridimensional en milímetros entre el centro apical del implante planificado y el centro apical del implante colocado.

Como variables de control se consideraron el operador, el modelo experimental, el tipo de implante, las dimensiones del implante, la secuencia de fresado, el software de planificación, el protocolo de impresión, la resina, el lavado, el postcurado y los criterios geométricos utilizados para la medición tridimensional.

4.5 Instrumento

El instrumento de recolección de datos correspondió a una matriz estructurada diseñada para registrar la información de cada implante colocado. Esta matriz incluyó la identificación del modelo experimental, grupo de estudio, operador, tipo de guía utilizada, flujo de impresión, impresora, resina, sitio implantario, dimensiones del implante, desviación angular, desviación lineal coronal, desviación lineal apical y observaciones relacionadas con el ajuste de la guía, estabilidad durante el fresado o incidencias del procedimiento.

Los datos obtenidos en el análisis tridimensional fueron registrados inicialmente en el instrumento de recolección y posteriormente digitalizados para su análisis estadístico (Ver apéndice B).

4.6 Procedimiento

El procedimiento experimental se desarrolló mediante un flujo digital compuesto por las siguientes fases: selección de imágenes CBCT, segmentación, planificación virtual del implante, diseño de guías, impresión de modelos, fabricación de guías quirúrgicas, colocación implantaria, adquisición tomográfica posoperatoria, registro tridimensional y medición de desviaciones.

4.6.1 Selección de tomografías y segmentación inicial

Se seleccionaron tomografías CBCT de archivo que cumplieran los criterios de inclusión definidos para el estudio. Los archivos DICOM fueron importados al software de planificación, donde se realizó la segmentación del maxilar o la mandíbula, según correspondiera, con el fin de obtener un modelo tridimensional del área de interés.

A partir de la reconstrucción tridimensional se generó un archivo STL del modelo anatómico, el cual fue utilizado para la planificación digital del implante y para la fabricación de los modelos físicos experimentales.

4.6.2 Planificación digital del implante

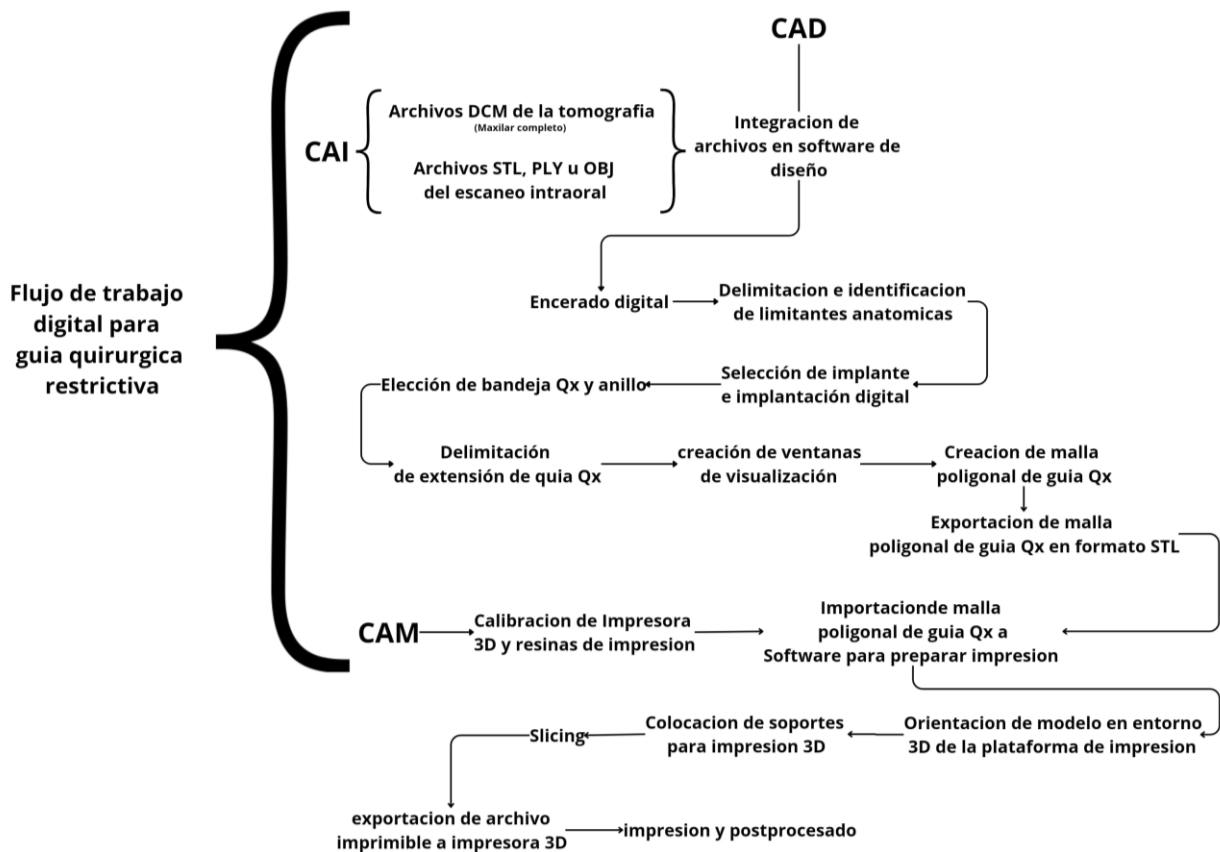
Sobre el modelo tridimensional segmentado se realizó la planificación virtual de la posición ideal del implante. Esta planificación definió la localización, angulación, profundidad y trayectoria del implante dentro del modelo experimental.

El implante planificado digitalmente fue considerado el patrón de referencia del estudio y se identificó como Implante Planificado (IP). Todas las mediciones posteriores de desviación angular y lineal se calcularon comparando la posición final de cada implante colocado con esta planificación inicial.

4.6.3 Diseño de las guías quirúrgicas

A partir de la planificación digital se diseñaron guías quirúrgicas restrictivas para los grupos guiados. Las guías fueron diseñadas para controlar la trayectoria de fresado y favorecer la transferencia de la posición planificada al modelo físico (figura 1).

Figura 1. *Flujograma de trabajo digital*



Se diseñaron dos tipos de guías:

Guía no específica — G-NS:

Guía quirúrgica fabricada mediante un flujo de impresión no específico para odontología.

Guía dental específica — G-DS:

Guía quirúrgica fabricada mediante un flujo de impresión dental específico, con impresora y resina destinadas a aplicaciones odontológicas.

4.6.4 Fabricación de modelos experimentales

Los modelos físicos experimentales fueron fabricados mediante impresión 3D a partir de los archivos STL obtenidos de la segmentación tomográfica. Todos los modelos fueron impresos bajo parámetros estandarizados, con el propósito de reducir la variabilidad dimensional entre las unidades experimentales.

La impresión de los modelos se realizó con una impresora LCD Elegoo Mars 5 Ultra, resina Anycubic Clear Standard y laminado mediante el software Chitubox. Los modelos se diseñaron con una pared externa de 1,2 mm y un patrón interno de relleno del 70 %, con el fin de mantener condiciones experimentales homogéneas durante el fresado y la inserción implantaria.

4.6.5 Fabricación de las guías quirúrgicas

Las guías quirúrgicas fueron fabricadas de acuerdo con el grupo experimental correspondiente.

La guía no específica se imprimió utilizando la impresora Elegoo Mars 5 Ultra y resina Anycubic Clear Standard, con laminado en Chitubox.

La guía dental específica se imprimió utilizando una impresora dental Shining 3D AccuFab-L4K y resina Portux, específica para guías quirúrgicas, con laminado mediante el software propio de la impresora.

Todos los modelos y guías fueron sometidos a un protocolo de postprocesado estandarizado, que incluyó lavado con alcohol isopropílico y curado UV en estación Elegoo Mercury, con el fin de favorecer la polimerización final y eliminar residuos de resina.

4.6.6 Distribución de los grupos experimentales

Los modelos experimentales fueron asignados a tres modalidades de colocación implantaria:

Grupo IMA: colocación del implante a mano alzada.

Grupo IG-NS: colocación del implante con guía quirúrgica no específica.

Grupo IG-DS: colocación del implante con guía quirúrgica dental específica.

Cada grupo incluyó 8 implantes, para un total de 24 colocaciones implantarias. En todos los casos se utilizaron implantes de iguales dimensiones, con el fin de estandarizar la comparación entre grupos. En todos los grupos se utilizaron implantes de titanio Microdent de 3,7 mm × 10 mm, con el fin de estandarizar la comparación entre las modalidades experimentales.

4.6.7 Colocación de los implantes

La colocación de los implantes fue realizada por operadores previamente calibrados. Antes de la fase experimental, los operadores recibieron entrenamiento en la secuencia de fresado, uso de las guías, inserción implantaria y criterios de profundidad final.

En el grupo de mano alzada, el operador realizó la preparación del lecho implantario y la inserción del implante sin guía quirúrgica, siguiendo la planificación digital inicial como referencia.

En los grupos guiados, las guías quirúrgicas fueron posicionadas sobre los modelos experimentales verificando su asentamiento antes del fresado. Posteriormente, se ejecutó la secuencia de fresado correspondiente y se insertó el implante siguiendo la trayectoria definida por la guía.

En todos los grupos se buscó mantener constante la secuencia de fresado, el tipo de implante, la profundidad de inserción y las condiciones de manipulación del modelo.

4.6.8 Adquisición tomográfica posoperatoria

Una vez colocados los implantes, los modelos fueron sometidos a tomografía CBCT posoperatoria bajo parámetros de adquisición estandarizados. Estas tomografías permitieron obtener la posición final de los implantes en cada grupo experimental.

Los archivos DICOM posoperatorios fueron exportados para su segmentación y posterior comparación con la planificación digital inicial.

4.6.9 Segmentación y aislamiento de los implantes colocados

Los archivos DICOM posoperatorios fueron importados al software de planificación para segmentar el modelo experimental con el implante colocado. Posteriormente, se generaron archivos STL correspondientes a cada escenario experimental.

Los archivos STL fueron procesados para aislar la geometría del implante colocado, eliminando el componente correspondiente al modelo físico. Este proceso permitió obtener archivos independientes para cada implante colocado en las tres modalidades evaluadas.

4.6.10 Registro tridimensional y análisis geométrico

Los archivos STL del implante planificado y de los implantes colocados fueron importados a un software de análisis tridimensional. En el flujo metodológico planteado se utilizaron Blue Sky Plan para la planificación y segmentación inicial, MeshMixer para la edición de mallas tridimensionales y Blender para el análisis geométrico final. Esta secuencia ya aparece en el procedimiento actual y se conserva como eje técnico del análisis.

Para cada implante se determinó el eje longitudinal y se generaron referencias geométricas estandarizadas. Posteriormente, se identificaron los puntos centrales coronal y apical de cada implante, tanto en la planificación digital inicial como en la posición final obtenida después de la colocación.

4.6.11 Medición de las desviaciones

Las desviaciones se calcularon comparando cada implante colocado con el implante planificado digitalmente.

Se determinaron las siguientes mediciones:

Desviación angular:

Ángulo tridimensional formado entre el eje longitudinal del implante planificado y el eje longitudinal del implante colocado.

Desviación lineal coronal:

Distancia euclidiana tridimensional entre el centro coronal del implante planificado y el centro coronal del implante colocado.

Desviación lineal apical:

Distancia euclidiana tridimensional entre el centro apical del implante planificado y el centro apical del implante colocado.

Todas las mediciones fueron registradas en milímetros para las desviaciones lineales y en grados para la desviación angular.

4.7. Plan de análisis estadístico

Se realizó inicialmente un análisis descriptivo de las variables desviación angular, desviación lineal coronal y desviación lineal apical para cada grupo experimental. Las variables cuantitativas fueron resumidas mediante media, desviación estándar, mediana, rango intercuartílico, valores mínimo y máximo, de acuerdo con su distribución.

La normalidad de los datos fue evaluada mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Cuando las variables cumplieron los supuestos de normalidad, la comparación entre las tres modalidades experimentales se realizó mediante ANOVA de medidas repetidas. En caso de no cumplirse dichos supuestos, se empleó la prueba no paramétrica de Friedman.

Cuando se identificaron diferencias estadísticamente significativas, se realizaron comparaciones post hoc entre pares de grupos, con el fin de establecer entre qué modalidades se presentaban dichas diferencias. El nivel de significancia estadística se estableció en $\alpha = 0,05$.

Los análisis fueron realizados con el software estadístico Stata versión 14.0.

4.8 Control de sesgo

Para reducir el sesgo de medición, se empleó un protocolo estandarizado de planificación, impresión, colocación implantaria, adquisición tomográfica posoperatoria y análisis

tridimensional. Todos los modelos experimentales fueron fabricados bajo parámetros de impresión definidos y las guías quirúrgicas fueron postprocesadas siguiendo un protocolo común de lavado y curado.

Los operadores fueron previamente entrenados y en la secuencia de fresado, inserción implantaria y uso de las guías quirúrgicas. La calibración incluyó la revisión del protocolo experimental, la verificación del asentamiento de las guías, la estandarización de la profundidad de fresado y la ejecución de una fase piloto para identificar posibles inconsistencias antes de la recolección definitiva de los datos.

Para disminuir la variabilidad en la medición, el análisis tridimensional fue realizado siguiendo los mismos criterios geométricos para todos los implantes. La planificación digital inicial se mantuvo como referencia única para la comparación con la posición final de cada implante, y las mediciones de desviación angular, coronal y apical fueron registradas de manera sistemática en la matriz de recolección de datos.

4.9 Consideraciones éticas

El presente estudio se clasifica como una investigación sin riesgo, de acuerdo con lo establecido en la Resolución 8430 de 1993, debido a que no se realizó intervención clínica directa sobre seres humanos ni modificación intencionada de variables biológicas, fisiológicas, psicológicas o sociales. La investigación se desarrolló a partir de tomografías CBCT de archivo previamente anonimizadas y de modelos experimentales impresos en 3D, utilizados exclusivamente con fines de planificación, simulación y medición tridimensional.

El estudio se desarrolló respetando los principios éticos de autonomía, beneficencia, no maleficencia y justicia. Asimismo, se garantizó la confidencialidad de la información derivada de

las imágenes tomográficas utilizadas y se siguieron las normas institucionales para el manejo de materiales, residuos y procedimientos de laboratorio establecidos por la Universidad Santo Tomás.

5. Resultados

5.1 Descripción de la muestra experimental

En la presente investigación se analizaron 24 colocaciones implantarias distribuidas en tres modalidades experimentales: colocación a mano alzada (IMA), cirugía guiada mediante flujo no específico (IG-NS) y cirugía guiada mediante flujo dental específico (IG-DS). Cada modalidad incluyó ocho implantes. La posición final de cada implante fue comparada con la planificación digital inicial, considerada como patrón de referencia del estudio.

5.2 Análisis descriptivo de las desviaciones

La técnica a mano alzada presentó los mayores valores promedio de desviación en las tres variables evaluadas. La desviación coronal fue de $1,738 \pm 0,342$ mm para IMA, $0,375 \pm 0,225$ mm para IG-NS y $0,400 \pm 0,193$ mm para IG-DS. De forma similar, la desviación apical fue mayor en el grupo IMA, con un promedio de $1,812 \pm 0,344$ mm, en comparación con $0,575 \pm 0,249$ mm en IG-NS y $0,537 \pm 0,220$ mm en IG-DS.

En relación con la desviación angular, la técnica IMA presentó un promedio de $8,691 \pm 1,522^\circ$, mientras que los grupos guiados mostraron valores considerablemente menores: $3,038 \pm 0,501^\circ$ para IG-NS y $3,100 \pm 0,441^\circ$ para IG-DS. (Tabla 1)

Estos resultados descriptivos muestran que las dos modalidades de cirugía guiada presentaron menores desviaciones lineales y angulares en comparación con la colocación a mano alzada. Asimismo, los valores obtenidos por IG-NS e IG-DS fueron muy similares entre sí, lo que

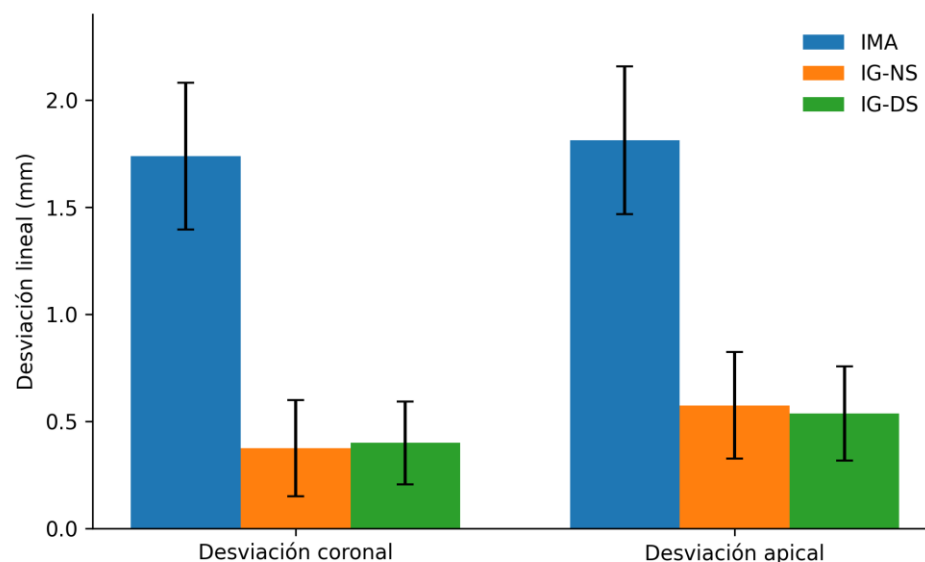
sugiere un comportamiento comparable entre ambos flujos guiados bajo las condiciones experimentales evaluadas. (Figura 2 y 3)

Tabla 1. *Desviación coronal, apical y angular según modalidad de colocación implantaria*

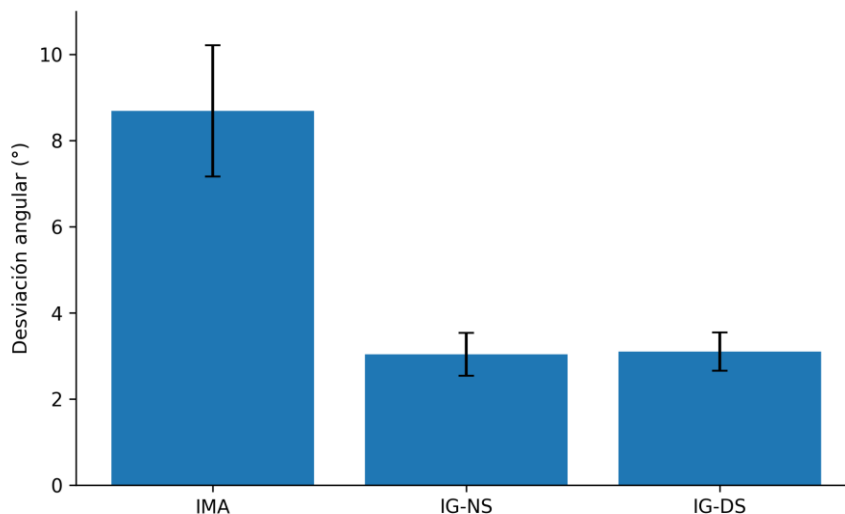
Variable	IMA		IG-NS		IG-DS	
Desviación coronal (mm)	1,738	± 0,342	0,375	± 0,225	0,400	± 0,193
	Mediana: 1,7 (1,50–2,10)		Mediana: 0,3 (0,25–0,50)		Mediana: 0,3 (0,30–0,55)	
Desviación apical (mm)	1,812	± 0,344	0,575	± 0,249	0,537	± 0,220
	Mediana: 1,7 (1,60–2,00)		Mediana: 0,5 (0,40–0,75)		Mediana: 0,5 (0,35–0,70)	
Desviación angular (°)	8,691	± 1,522	3,038	± 0,501	3,100	± 0,441
	Mediana: 8,89 (7,60–9,92)		Mediana: 3,00 (2,65–3,50)		Mediana: 3,05 (2,80–3,25)	

Nota. Los valores se presentan como media ± desviación estándar y mediana (rango intercuartílico). IMA: implantes colocados a mano alzada; IG-NS: cirugía guiada mediante flujo no específico; IG-DS: cirugía guiada mediante flujo dental específico.

Figura 2. *Comparación de las desviaciones lineales coronal y apical entre modalidades experimentales*



Nota. Las barras representan la media y las líneas de error la desviación estándar.

Figura 3. Comparación de la desviación angular entre modalidades experimentales

Nota. Las barras representan la media y las líneas de error la desviación estándar.

5.3 Comparación estadística entre modalidades

La comparación global entre las tres modalidades experimentales evidenció diferencias estadísticamente significativas para la desviación coronal, apical y angular. Las comparaciones post hoc mostraron que la técnica IMA presentó desviaciones significativamente mayores que IG-NS e IG-DS en las tres variables evaluadas.

Para la desviación coronal, se observaron diferencias significativas entre IMA e IG-NS, así como entre IMA e IG-DS. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre IG-NS e IG-DS. Este mismo comportamiento se observó para la desviación apical y la desviación angular.

En conjunto, los resultados indican que la cirugía guiada, independientemente del flujo de fabricación utilizado, redujo significativamente la desviación de los implantes frente a la

colocación a mano alzada. No obstante, el flujo dental específico no mostró superioridad estadísticamente significativa frente al flujo no específico. (Tabla 2)

Tabla 2. Comparaciones post hoc de la desviación coronal, apical y angular entre modalidades experimentales

<i>Variable</i>	<i>Comparación</i>	<i>p global</i>	<i>p ajustado post hoc</i>	<i>Resultado</i>
Coronal (mm)	IG-NS vs. IG-DS	<0,001	1,000	No significativa
Coronal (mm)	IG-NS vs. IMA	<0,001	0,002	Significativa
Coronal (mm)	IG-DS vs. IMA	<0,001	0,005	Significativa
Apical (mm)	IG-NS vs. IG-DS	<0,001	1,000	No significativa
Apical (mm)	IG-NS vs. IMA	<0,001	0,003	Significativa
Apical (mm)	IG-DS vs. IMA	<0,001	0,006	Significativa
Angular (°)	IG-NS vs. IG-DS	<0,001	1,000	No significativa
Angular (°)	IG-NS vs. IMA	<0,001	0,003	Significativa
Angular (°)	IG-DS vs. IMA	<0,001	0,005	Significativa

Nota. Los valores corresponden a comparaciones post hoc con ajuste por comparaciones múltiples. Nivel de significancia: $p < 0,05$.

5.4 Síntesis de los hallazgos

Los hallazgos permiten establecer que la técnica a mano alzada presentó la mayor desviación respecto a la planificación digital inicial, mientras que las dos técnicas guiadas mostraron una mayor capacidad para reproducir la posición planificada. Bajo las condiciones de este modelo experimental in vitro, los flujos IG-NS e IG-DS tuvieron un desempeño similar en términos de desviación coronal, apical y angular.

Por tanto, la principal diferencia observada no se presentó entre los dos flujos guiados, sino entre la colocación a mano alzada y las modalidades de cirugía guiada. Esto sugiere que el uso de guías restrictivas contribuyó a reducir la variabilidad en la transferencia de la planificación digital, independientemente del flujo de fabricación empleado en las condiciones evaluadas.

6. Discusión

El presente estudio comparó la desviación angular, lineal coronal y lineal apical de implantes dentales colocados mediante técnica a mano alzada y mediante dos flujos de cirugía guiada en un modelo experimental in vitro. Los hallazgos principales demostraron que la técnica

a mano alzada presentó las mayores desviaciones en las tres variables evaluadas, mientras que las dos modalidades de cirugía guiada mostraron valores considerablemente menores respecto a la planificación digital inicial. Sin embargo, al comparar los dos flujos guiados entre sí, el flujo dental específico no evidenció superioridad estadísticamente significativa frente al flujo no específico bajo las condiciones experimentales del estudio.

La mayor desviación observada en la técnica a mano alzada puede explicarse por la ausencia de un dispositivo físico que limite la trayectoria del fresado y la angulación de inserción. Aunque la planificación digital aporta una referencia tridimensional, en la técnica manual su ejecución depende principalmente de la interpretación visual, la experiencia del operador y la estabilidad manual durante la preparación del lecho implantario. Esta dependencia incrementa la probabilidad de variaciones acumuladas desde el punto de entrada hasta la porción apical del implante.

La literatura sobre cirugía implantológica guiada respalda esta interpretación. Wegmüller et al. evaluaron guías de perforación fabricadas mediante tecnologías profesionales y de consumo para cirugía implantaria estática asistida por computador, y señalaron que este enfoque permite transferir la planificación digital mediante un dispositivo físico de control (Wegmüller et al., 2021). En su estudio, las guías se diseñaron a partir de diez casos clínicos y se compararon tecnologías Material Jetting, SLA, FFF y DLP; aunque existieron diferencias estadísticamente significativas entre tecnologías, los autores concluyeron que las desviaciones podían ser clínicamente pequeñas cuando el flujo estaba controlado (Wegmüller et al., 2021). Esta observación coincide con el presente estudio, en el que ambas modalidades guiadas presentaron menor desviación que la mano alzada.

La comparación con estudios que evalúan guías impresas en 3D frente a técnicas menos controladas también fortalece la interpretación. Abduo y Lau compararon guías fresadas, guías impresas con impresora comercial y guías impresas con impresora de escritorio para cirugía implantaria estática. Sus resultados indicaron que las técnicas de fabricación modifican la exactitud de la guía, y que la fabricación por fresado puede ser menos vulnerable a la distorsión de asentamiento que la impresión. Sin embargo, también evidenciaron que las guías impresas pueden alcanzar valores de precisión clínicamente útiles cuando el flujo es controlado (Abduo & Lau, 2020). En el presente estudio, el rendimiento de los flujos guiados fue favorable incluso frente a la técnica manual, lo que sugiere que la presencia de una guía restrictiva tuvo un efecto dominante sobre la reducción del error operatorio.

Los resultados también son coherentes con Yeung et al., quienes evaluaron la exactitud y precisión de guías implantológicas impresas en 3D utilizando diferentes sistemas implantarios. Aunque el comportamiento varió según el sistema, los autores reportaron que las guías impresas en 3D pueden mantener desviaciones dentro de rangos clínicamente aceptables en condiciones in vitro (Yeung et al., 2020). Esta evidencia es útil para contextualizar los valores del presente estudio, donde los grupos guiados presentaron desviaciones lineales inferiores a 0,6 mm y desviaciones angulares cercanas a 3°.

La desviación coronal representa la discrepancia entre el centro coronal del implante planificado y el centro coronal del implante colocado. En términos clínicos, este punto condiciona la emergencia protésica, la posición de la plataforma, el perfil de emergencia y la relación con las paredes óseas. En el presente estudio, la desviación coronal de IMA fue aproximadamente cuatro veces mayor que la observada en los flujos guiados. Esto sugiere que las guías quirúrgicas

restringieron de manera efectiva el punto inicial de fresado y redujeron la variabilidad asociada al control manual.

La desviación apical fue también mayor en la técnica a mano alzada. Este hallazgo es importante porque el error apical no depende únicamente de una posición coronal incorrecta, sino también de la trayectoria tridimensional del implante. Una pequeña variación angular puede amplificarse hacia la zona apical, especialmente en implantes de mayor longitud. En este estudio, la desviación apical de IMA fue de $1,812 \pm 0,344$ mm, mientras que IG-NS e IG-DS se mantuvieron alrededor de 0,5 mm. Desde el punto de vista quirúrgico, esta diferencia puede ser relevante en zonas próximas a estructuras anatómicas críticas, como seno maxilar, conducto dentario inferior, corticales delgadas o concavidades óseas.

La desviación angular mostró una diferencia especialmente marcada: IMA alcanzó $8,691 \pm 1,522^\circ$, mientras que los flujos guiados se mantuvieron alrededor de 3° . Este resultado es consistente con el principio mecánico de la guía restrictiva, porque el control de la angulación depende de la relación entre el canal guía, la fresa y el eje planificado. Una desviación angular elevada puede modificar la emergencia protésica, aumentar la necesidad de componentes angulados, alterar la distribución de cargas y complicar la rehabilitación. Por ello, la reducción angular observada en los grupos guiados constituye uno de los hallazgos más relevantes del estudio.

El hallazgo más distintivo de esta investigación fue que el flujo no específico y el flujo dental específico tuvieron un desempeño muy similar. Esto es relevante porque, desde una perspectiva tecnológica, podría esperarse que una impresora dental específica y una resina indicada para guías quirúrgicas generaran una precisión superior frente a una impresora LCD no

odontológica y una resina estándar. Sin embargo, los resultados no demostraron superioridad estadísticamente significativa del flujo dental específico frente al flujo no específico.

Rouzé l'Alzit et al. evaluaron la exactitud de guías quirúrgicas pequeñas y de arco completo fabricadas con cinco tecnologías de manufactura aditiva: SLA, DLP, FDM, SLS e Inkjet/PolyJet. El objetivo fue determinar cómo la tecnología y la extensión de la guía afectaban la exactitud. Sus resultados mostraron que la extensión de la guía puede influir de manera importante y que no todas las diferencias entre tecnologías se traducen necesariamente en ventajas clínicas directas (Rouzé l'Alzit et al., 2022). Este estudio es particularmente útil para interpretar los resultados actuales: la similitud entre IG-NS e IG-DS puede explicarse porque la exactitud no depende exclusivamente de que el sistema sea dental o no dental, sino de la suma de diseño, extensión, asentamiento y control del flujo.

En una línea similar, Wegmüller et al. compararon impresoras de consumo frente a una impresora profesional de alta gama para producir guías quirúrgicas. Reportaron valores RMS de $0,09 \pm 0,01$ mm para Material Jetting, $0,12 \pm 0,02$ mm para SLA, $0,18 \pm 0,04$ mm para FFF y $0,25 \pm 0,05$ mm para DLP. Aunque las diferencias fueron estadísticamente significativas, los autores concluyeron que algunas desviaciones eran pequeñas desde el punto de vista clínico y que las impresoras de consumo podían producir guías con exactitud comparable a equipos profesionales bajo condiciones controladas (Wegmüller et al., 2021). Esta conclusión se alinea directamente con el presente estudio, donde un flujo no específico alcanzó desviaciones similares al flujo dental específico.

No obstante, la literatura no es uniforme. Gjelvold et al. compararon guías fabricadas con dos impresoras 3D de escritorio para cirugía guiada por tomografía donde reportaron diferencias significativas en variables como punto de entrada y posición vertical del implante. Este estudio es

importante porque matiza la interpretación: que en el presente trabajo IG-NS e IG-DS hayan sido similares no significa que todas las impresoras o todos los flujos no específicos puedan comportarse igual (Yilmaz et al., 2020) La conclusión adecuada es que, en las condiciones experimentales evaluadas, el flujo no específico fue comparable, pero no que exista equivalencia universal entre tecnologías.

Morón-Conejo et al. evaluaron la exactitud de guías quirúrgicas fabricadas con cuatro impresoras 3D diferentes. Su estudio reportó diferencias asociadas al equipo utilizado, lo que refuerza la idea de que la impresora puede influir sobre la exactitud final de la guía (Morón-Conejo et al., 2024). En contraste, el presente estudio no encontró diferencias entre el flujo dental específico y el no específico en la posición final del implante. Esta diferencia entre estudios puede explicarse por variaciones en el diseño experimental, tamaño y extensión de la guía, resinas utilizadas, parámetros de impresión, criterios de medición, tipo de análisis y condiciones de postprocesado.

Seidel et al. evaluaron la exactitud del alojamiento de los sleeves en guías impresas y fresadas, considerando tipo de máquina, grosor de capa, posición del sleeve y esterilización, encontrando diferencias significativas entre métodos de producción; en particular, algunos sistemas DLP presentaron desviaciones menores, mientras que la esterilización aumentó las desviaciones. Antes de esterilización, un grupo DLP a 50 μm mostró desviaciones de $0,091 \pm 0,04$ mm, y después de la esterilización las desviaciones aumentaron en todos los grupos (Seidel et al., 2025). Estos datos ayudan a entender que la precisión del canal guía o del alojamiento del sleeve es un componente crítico del flujo, aunque el presente estudio midió el resultado final del implante y no la geometría aislada de la guía.

Beyer et al. compararon guías implantológicas producidas mediante SLA y DLP, evaluando precisión de superficie, tiempo de fabricación y consumo de resina. Los autores reportaron desviaciones RMS promedio muy próximas entre SLA y DLP, alrededor de 0,120 mm y 0,124 mm, respectivamente. Este tipo de evidencia apoya la interpretación de que dos flujos distintos pueden generar diferencias dimensionales pequeñas cuando el proceso está controlado, lo cual coincide con la ausencia de diferencia significativa entre IG-NS e IG-DS en el presente estudio (Beyer et al., 2025).

La resina empleada constituye otro factor determinante en la fabricación de guías quirúrgicas. Las resinas para guías deben mantener estabilidad dimensional, resistencia mecánica, comportamiento adecuado frente al lavado y postcurado, y, si se proyecta uso clínico, biocompatibilidad y compatibilidad con procesos de desinfección o esterilización. En el presente estudio, el flujo no específico utilizó resina Anycubic Clear Standard, mientras que el flujo dental específico utilizó resina Portux para aplicaciones odontológicas. La ausencia de diferencia significativa entre ambos flujos sugiere que, en este modelo experimental in vitro, la resina no específica mantuvo estabilidad suficiente para transferir la planificación con precisión comparable. Sin embargo, esta conclusión debe limitarse al contexto experimental.

Keßler et al. evaluaron la influencia del método de impresión, el material de resina y la esterilización sobre la exactitud de guías implantológicas diseñadas virtualmente. Sus resultados son relevantes porque muestran que la exactitud puede verse modificada por la interacción entre impresora, material y esterilización, no únicamente por el diseño CAD (Keßler et al., 2022). Esta evidencia permite interpretar que la similitud entre IG-NS e IG-DS no elimina la necesidad de validar el comportamiento dimensional y biológico de la resina en condiciones clínicas.

Yazigi et al. evaluaron la exactitud y el ajuste de guías quirúrgicas impresas en 3D antes y después de esterilización con vapor, utilizando cinco resinas imprimibles. El estudio demuestra que la esterilización es una variable relevante para la exactitud y el ajuste de las guías (Yazigi et al., 2023) Por tanto, los resultados del presente estudio deben interpretarse como evidencia de exactitud geométrica in vitro, pero no como validación clínica completa de un flujo no específico. Para su uso en pacientes se requeriría comprobar biocompatibilidad, esterilización, ausencia de residuos tóxicos, resistencia mecánica y estabilidad del ajuste después del procesamiento clínico.

Ntovas et al. evaluaron el efecto del tiempo y condiciones de almacenamiento sobre la estabilidad dimensional de guías impresas. Fabricaron guías con diferentes resinas y analizaron condiciones como exposición a luz solar, ambiente interior y oscuridad. En sus resultados, reportaron variaciones en la estabilidad dimensional dependiendo de la resina y la condición de almacenamiento, y recomendaron controlar este factor (Ntovas et al., 2025). Este hallazgo es importante para el presente trabajo porque las guías fueron empleadas en condiciones experimentales controladas; en la práctica clínica, el almacenamiento, transporte y tiempo entre impresión y cirugía podrían modificar el ajuste y la exactitud final.

En conjunto, estos estudios refuerzan una idea central: la precisión de una guía quirúrgica impresa no se determina únicamente en el momento de la impresión. El resultado final depende de una secuencia completa que incluye selección de material, lavado, curado, almacenamiento, esterilización y manipulación. Por ello, aunque el flujo no específico del presente estudio fue comparable al flujo dental específico, esta comparación debe entenderse como una evaluación experimental de exactitud y no como una equivalencia clínica o regulatoria.

La orientación de impresión es otro elemento importante para interpretar los resultados. Tahir y Abduo evaluaron el efecto de diferentes orientaciones de impresión en la exactitud de

plantillas implantológicas fabricadas con una impresora DLP de escritorio. Reportaron que las plantillas impresas horizontalmente exhibieron mejor exactitud y recomendaron orientar la dimensión mayor de la plantilla paralela a la plataforma de impresión para reducir desviaciones (Tahir & Abduo, 2022). En el presente estudio, la orientación no fue evaluada como variable independiente, pero su control pudo contribuir a la similitud entre IG-NS e IG-DS.

Ali et al. evaluaron la influencia de la orientación de impresión sobre paralelismo, distancia y espesor de cilindros adyacentes en guías quirúrgicas impresas en 3D. Encontraron que la orientación de impresión influyó en la distancia entre cilindros, el paralelismo y el espesor de pared, y que los objetos impresos diferían del modelo de referencia (Ali et al., 2023). Este estudio es especialmente pertinente porque en cirugía guiada el cilindro o canal que orienta la fresa condiciona directamente la desviación angular y apical. En el presente trabajo, las desviaciones angulares similares entre IG-NS e IG-DS podrían reflejar que ambos flujos mantuvieron una geometría funcional adecuada de los canales guía.

Panjnough et al. evaluaron el efecto del grosor de capa de impresión sobre la exactitud de colocación implantaria, comparando guías fabricadas a 50 μm y 100 μm . Aunque no encontraron diferencias significativas para algunas variables lineales, sí reportaron influencia sobre la desviación angular, recomendando considerar 50 μm en situaciones con limitaciones anatómicas (Panjnough et al., 2023). Este hallazgo permite explicar por qué la desviación angular debe recibir especial atención. En el presente estudio, la reducción de la desviación angular desde 8,691° en IMA hasta aproximadamente 3° en los grupos guiados indica que ambos flujos lograron controlar la orientación del eje implantario; sin embargo, estudios como el de Panjnough demuestran que pequeños cambios de impresión pueden afectar esta variable (Panjnough et al., 2023).

El diseño del sistema de restricción también puede modificar la exactitud. Estudios recientes han comparado guías con y sin sleeves metálicos, así como guías impresas y fresadas. Ballesteros et al. reportaron que el método de fabricación y la presencia o ausencia de sleeves pueden influir en la exactitud de colocación implantaria, con diferencias en desviaciones crestales, apicales y angulares (Ballesteros et al., 2025) Este tipo de evidencia sugiere que, en el presente estudio, la similitud entre IG-NS e IG-DS no puede explicarse únicamente por la impresora o la resina; también pudo depender del diseño restrictivo de la guía y de la compatibilidad entre canal, fresa e implante.

Mukai et al. compararon la reproducibilidad y precisión de guías quirúrgicas fabricadas por fresado y por impresión 3D. Aunque el fresado puede mostrar menor variabilidad en ciertos contextos, los autores reportaron que la impresión 3D puede alcanzar reproducibilidad aceptable cuando el proceso está controlado (Mukai et al., 2021) Esta evidencia es útil para interpretar los resultados actuales: el flujo dental específico no fue superior al no específico, posiblemente porque ambos mantuvieron un nivel suficiente de control dimensional para el propósito experimental.

Lo Russo et al. revisaron la exactitud tridimensional de guías para cirugía implantaria estática asistida por computador y destacaron la heterogeneidad de métodos, equipos y parámetros de medición. Su conclusión fue que no existe evidencia definitiva para afirmar de manera absoluta qué tecnología de fabricación produce guías más exactas, aunque el fresado podría ofrecer menor variación en algunos contextos (Lo Russo et al., 2023). Esta conclusión se alinea con la presente investigación, en la cual no se observó superioridad del flujo dental específico sobre el flujo no específico. Más que la tecnología aislada, parece determinante la estandarización del flujo completo.

Shi et al. realizaron una revisión sistemática sobre exactitud de guías digitales para implantología, evaluando factores como tipo de soporte, método de fabricación, diseño, fijación y sleeves. Esta revisión resalta que la exactitud de la cirugía guiada depende de múltiples factores y que los estudios son difíciles de comparar por diferencias metodológicas (Shi et al., 2023) El presente estudio se ubica dentro de esa problemática: la desviación final del implante es el resultado acumulado de diseño, impresión, ajuste, fresado, inserción y medición tridimensional. Por ello, la interpretación de IG-NS frente a IG-DS debe ser prudente.

Desde una perspectiva clínica, los hallazgos respaldan el uso de cirugía guiada como estrategia para mejorar la exactitud implantaria frente a la técnica a mano alzada. La reducción de desviaciones coronal, apical y angular puede favorecer una posición protésicamente más adecuada, disminuir riesgos anatómicos y mejorar la reproducibilidad del procedimiento. Sin embargo, la extrapolación clínica debe hacerse con cautela, porque el estudio fue realizado en modelos in vitro y no reproduce variables como saliva, sangre, tejidos blandos, apertura bucal limitada, movilidad del paciente, visibilidad reducida, estabilidad mucosa o tolerancia quirúrgica.

Desde una perspectiva académica y operativa, el hallazgo más interesante es que el flujo no específico alcanzó un desempeño comparable al flujo dental específico. Esto puede tener importancia en instituciones con restricciones económicas o tecnológicas, donde el acceso a impresoras dentales validadas puede ser limitado. No obstante, la interpretación correcta no es que cualquier sistema no odontológico pueda utilizarse clínicamente, sino que ciertos flujos no específicos, bajo condiciones controladas, podrían alcanzar exactitud geométrica similar a la de flujos dentales especializados.

La distinción entre exactitud geométrica y seguridad clínica es fundamental. Una guía impresa con un flujo no específico puede presentar buena adaptación en un modelo experimental,

pero ello no garantiza biocompatibilidad, resistencia a esterilización, estabilidad dimensional después de almacenamiento, trazabilidad del material, ausencia de residuos tóxicos o cumplimiento regulatorio para uso intraoral. Por tanto, los resultados del presente estudio permiten discutir factibilidad técnica en laboratorio, pero no sustituyen la validación clínica ni regulatoria.

La principal limitación del estudio es su diseño in vitro. Aunque este enfoque permitió controlar variables externas y concentrar el análisis en la transferencia de la planificación digital al modelo físico, los modelos impresos no reproducen completamente la resistencia, heterogeneidad, elasticidad ni comportamiento biológico del hueso cortical y esponjoso. Tampoco incorporan tejidos blandos, saliva, sangrado, limitaciones de acceso, movimiento del paciente o estabilidad variable de la guía sobre tejidos vivos.

Otra limitación corresponde al tamaño muestral. Cada modalidad incluyó ocho implantes, lo que permitió observar diferencias claras entre mano alzada y cirugía guiada, pero puede limitar la detección de diferencias pequeñas entre IG-NS e IG-DS. Por esta razón, la ausencia de diferencia significativa entre ambos flujos no debe interpretarse como equivalencia absoluta, sino como similitud de desempeño bajo las condiciones experimentales evaluadas.

También debe considerarse que la desviación final del implante no depende exclusivamente de la guía, sino de la acumulación de errores en todo el flujo digital: adquisición CBCT, segmentación, exportación STL, planificación, diseño, laminado, impresión, lavado, curado, ajuste, tomografía posoperatoria, aislamiento del implante y registro tridimensional. Estudios futuros deberían evaluar de manera independiente el error en cada etapa, por ejemplo, comparando el archivo CAD de la guía con la guía impresa, la guía impresa con la guía postcurada, y la posición final del implante con la planificación digital inicial.

En conjunto, la presente investigación aporta evidencia experimental relevante al demostrar que la cirugía guiada redujo de manera clara la desviación coronal, apical y angular frente a la colocación a mano alzada. Además, aporta un hallazgo diferencial al mostrar que, en condiciones in vitro controladas, un flujo de impresión no específico puede alcanzar una precisión comparable a la de un flujo dental específico. Este resultado no invalida la utilidad de los sistemas dentales especializados, pero sí sugiere que la exactitud implantaria depende de la calidad del flujo digital completo y no exclusivamente de la clasificación comercial de la impresora o la resina utilizada.

La interpretación más sólida es que la cirugía guiada, cuando se diseña, imprime, procesa y verifica bajo condiciones estandarizadas, mejora la transferencia de la planificación digital a la posición final del implante. No obstante, la equivalencia clínica entre flujos requiere estudios adicionales que evalúen biocompatibilidad, esterilización, almacenamiento, resistencia mecánica, estabilidad dimensional, seguridad regulatoria y desempeño en pacientes.

7. Conclusiones

La técnica a mano alzada presentó las mayores desviaciones coronal, apical y angular respecto a la planificación digital inicial. Este hallazgo evidencia que, aun bajo condiciones experimentales controladas, la colocación manual depende en mayor medida de la habilidad del operador y presenta menor capacidad para reproducir con exactitud la posición implantaria planificada.

Las dos modalidades de cirugía guiada evaluadas mostraron una reducción importante de la desviación lineal y angular en comparación con la técnica a mano alzada. Esto demuestra que

el uso de guías quirúrgicas restrictivas favorece una mejor transferencia de la planificación digital al modelo experimental.

El flujo guiado no específico y el flujo dental específico presentaron valores similares de desviación coronal, apical y angular. Por tanto, bajo las condiciones in vitro de este estudio, ambos flujos permitieron una reproducción comparable de la posición planificada del implante.

El flujo dental específico no demostró superioridad estadísticamente significativa frente al flujo no específico. Este resultado sugiere que la precisión final no depende exclusivamente de que el sistema de impresión sea odontológico, sino de la adecuada estandarización del flujo digital, la fabricación de la guía, el postprocesado y la verificación del asentamiento.

Los resultados respaldan el uso de cirugía guiada como estrategia para mejorar la exactitud en la colocación implantaria. Sin embargo, al tratarse de un estudio in vitro, los hallazgos deben interpretarse con cautela y requieren validación en escenarios clínicos que incluyan mayor variabilidad anatómica, operatoria y biológica

7.1 Recomendaciones

Futuras investigaciones deberían ampliar el tamaño muestral, incorporar diferentes tecnologías de impresión, comparar más resinas, evaluar orientación de impresión, grosor de capa, tiempo de almacenamiento, esterilización, diseño con y sin sleeves, extensión de la guía, tipo de soporte y condiciones clínicas o ex vivo. También sería pertinente validar si el desempeño comparable entre flujo no específico y flujo dental específico se mantiene en escenarios anatómicamente complejos y bajo condiciones reales de cirugía.

Referencias

- Adams, C. R., Ammoun, R., Deeb, G. R., & Bencharit, S. (2023). Influence of Metal Guide Sleeves on the Accuracy and Precision of Dental Implant Placement Using Guided Implant Surgery: An In Vitro Study. *Journal of Prosthodontics*, 32(1), 62–70. <https://doi.org/10.1111/jopr.13503>
- Arias, M., Sangrador, O., & Tipos, C. (2013). Fundamentos de medicina basada en la evidencia Tipos de estudios epidemiológicos. *De Estudios Epidemiológicos. Evid Pediatr*, 9, 53. <http://www.evidenciasenpediatria.es> Este artículo está disponible en: <http://www.evidenciasenpediatria.es/EnlaceArticulo?ref=2013;9:53>
- Banerjee, S., Debnath, A., Paul, P., & Banerjee, T. N. (2025). Comparison of accuracy in freehand versus computer-Assisted (dynamic and static) dental implant placement: A systematic review and meta-Analysis. In *Journal of Indian Prosthodontic Society* (Vol. 25, Number 1, pp. 22–29). Wolters Kluwer Medknow Publications. https://doi.org/10.4103/jips.jips_369_24
- Bhalerao, A., Marimuthu, M., Wahab, A., & Ayoub, A. (2023). Dynamic navigation for zygomatic implant placement: A randomized clinical study comparing the flapless versus the conventional approach. *Journal of Dentistry*, 130. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104436>
- Carrico, C., Skrjanc, L., Kanduti, D., Deeb, G., & Deeb, J. G. (2024). Effect of guided implant placement learning experiences on freehand skills: A pilot study. *Clinical and Experimental Dental Research*, 10(2). <https://doi.org/10.1002/cre2.878>
- Dioguardi, M., Spirito, F., Quarta, C., Sovereto, D., Basile, E., Ballini, A., Caloro, G. A., Troiano, G., Lo Muzio, L., & Mastrangelo, F. (2023a). Guided Dental Implant Surgery: Systematic

- Review. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 12, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcm12041490>
- Dioguardi, M., Spirito, F., Quarta, C., Sovereto, D., Basile, E., Ballini, A., Caloro, G. A., Troiano, G., Lo Muzio, L., & Mastrangelo, F. (2023b). Guided Dental Implant Surgery: Systematic Review. In *Journal of Clinical Medicine* (Vol. 12, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/jcm12041490>
- Feng, Y., Su, Z., Mo, A., & Yang, X. (2022). Comparison of the accuracy of immediate implant placement using static and dynamic computer-assisted implant system in the esthetic zone of the maxilla: a prospective study. *International Journal of Implant Dentistry*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40729-022-00464-w>
- Guentsch, A., Sukhtankar, L., An, H., & Luepke, P. G. (n.d.). *Precision and trueness of implant placement with and without static surgical guides: An in vitro study*.
- Jones, A. (2018). Accuracy of mucosa supported guided dental implant surgery. *Clinical Case Reports*, 6(11), 2131–2139. <https://doi.org/10.1002/ccr3.1809>
- Lou, F., Rao, P., Zhang, M., Luo, S., Lu, S., & Xiao, J. (2021). Accuracy evaluation of partially guided and fully guided templates applied to implant surgery of anterior teeth: A randomized controlled trial. *Clinical Implant Dentistry and Related Research*, 23(1), 117–130. <https://doi.org/10.1111/cid.12980>
- Markiewicz, M., & Nowicki, A. A. (2025). Accuracy of Computer-Guided Dental Implant Placement: A Clinical Comparison of Three Surgical Guide Types. *Journal of Clinical Medicine*, 14(24). <https://doi.org/10.3390/jcm14248652>
- Putra, R. H., Yoda, N., Astuti, E. R., & Sasaki, K. (2022). The accuracy of implant placement with computer-guided surgery in partially edentulous patients and possible influencing

factors: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Prosthodontic Research*, 66(1), 29–39. https://doi.org/10.2186/jpr.JPR_D_20_00184

Raico Gallardo, Y. N., da Silva-Olivio, I. R. T., Mukai, E., Morimoto, S., Sesma, N., & Cordaro, L. (2017). Accuracy comparison of guided surgery for dental implants according to the tissue of support: a systematic review and meta-analysis. In *Clinical Oral Implants Research* (Vol. 28, Number 5, pp. 602–612). Blackwell Munksgaard. <https://doi.org/10.1111/clr.12841>

Romandini, M., Ruales-Carrera, E., Sadilina, S., Hämmerle, C. H. F., & Sanz, M. (2023). Minimal invasiveness at dental implant placement: A systematic review with meta-analyses on flapless fully guided surgery. In *Periodontology 2000* (Vol. 91, Number 1, pp. 89–112). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/prd.12440>

Søndergaard, K., Hosseini, M., Storgård Jensen, S., Spin-Neto, R., & Gotfredsen, K. (2021). Fully versus conventionally guided implant placement by dental students: A randomized controlled trial. *Clinical Oral Implants Research*, 32(9), 1072–1084. <https://doi.org/10.1111/clr.13802>

Apéndices

Apéndice A. Cuadro de operacionalización de variables

Variable	Def. Conceptual	Def. Operacional	Naturaleza	Escala	Valores que asume
Tipo de cirugía	hace referencia a la clasificación de la intervención con base en los factores de su propósito, en este estudio se habla de cirugía guiada de implantes dentales y cirugía de implantes dentales a mano alzada (sin guía)	identificar y categorizar la intervención según características específicas. Cirugía con guía, cirugía sin guía	Cualitativa	Nominal	1-Guía estricta 2-Sin guía
Profundidad de fresado.	Medida de perforación con instrumento de corte en simuladores impresos en 3d obtenidos de pacientes aleatoriamente.	Perforación con fresas calibradas para crear lecho óptimo para colocación del implante.	Cuantitativa	Continua	1mm, 2mm, 3mm, 4mm

Apéndice B. Instrumento**TASA DE DESVIACION EN MILIMETROS SEGÚN TÉCNICA QUIRÚRGICA:
CIRUGIA GUIADA ESTRUCTA VS CIRUGIA SIN GUIA**

Fecha	DD	MM	AA	Implante número:		Marca	N	A	S
-------	----	----	----	------------------	--	-------	---	---	---

Tipo de técnica quirúrgica:

Guía estricta:		Sin guía:	
----------------	--	-----------	--

Sextante número: I ____ II ____ III ____ |

Mm mesial	1mm	2mm	3mm	4mm
-----------	-----	-----	-----	-----

Mm distal	1mm	2mm	3mm	4mm
-----------	-----	-----	-----	-----

Mm Nivel crestal	1mm	2mm	3mm	4mm
------------------	-----	-----	-----	-----

Mm de Limitantes anatómicas	1mm	2mm	3mm	4mm
-----------------------------	-----	-----	-----	-----

Costos	Alto	Medio	Bajo
--------	------	-------	------

Apéndice C. *Plan de análisis estadístico de los datos univariado*

Variable	Naturaleza	Escala de medición	Prueba estadística
Tipo de cirugía	Cualitativa	Nominal	Frecuencias y números absolutos
Tipo de Guía	Cualitativa	Nominal	Frecuencias y números absolutos
Marca	Cualitativa	Nominal	Frecuencias y números absolutos
Profundidad de fresado	Cuantitativa	Nominal	Media y desviación estándar.
Costos	Cuantitativa	Nominal	Media y desviación estándar.

Apéndice D. *Plan de análisis estadístico de los datos bivariado*

Objetivos	Variable 1	Variable 2	Pruebas estadísticas.
Comparar la precisión desenlace y efectividad clínicos de la colocación de implantes dentales con guía quirúrgica estricta y sin guía quirúrgica en simuladores que asemejen la biología ósea del ser humano	Profundidad de fresado	Profundidad de fresado	Correlación, Prueba T-Student, Anova y caja de bigotes
	Precisión encontrada	Precisión encontrada	Correlación, Prueba T-Student, Anova y caja de bigotes.