

TESIS DOCTORAL



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud

Evaluación de la precisión en la predictibilidad del movimiento
de expansión transversal con alineadores.

Autor/a:

Óscar Suárez Casado

Directores/as:

Dr. D. Pedro Colino Gallardo

Dr. D. José Manuel Granero Marín

Murcia, agosto de 2025

TESIS DOCTORAL



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud

Evaluación de la precisión en la predictibilidad del movimiento
de expansión transversal con alineadores.

Autor/a:

Óscar Suárez Casado

Directores/as:

Dr. D. Pedro Colino Gallardo

Dr. D. José Manuel Granero Marín

Murcia, agosto de 2025

AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Pedro Colino Gallardo y el Dr. D. José Manuel Granero Marín como directores de la Tesis Doctoral titulada “Comprobación de la precisión de la predictibilidad en el movimiento de expansión con alineadores” realizada por D. Óscar Suárez Casado en el Programa de Doctorado en Ciencias de la Salud, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento al Real Decreto 99/2011 de 28 de enero, en Murcia a 31 de agosto de 2025.



RESUMEN

Los alineadores son una opción terapéutica en ortodoncia que tiene grandes ventajas como la estética, comodidad y prescripciones individualizadas para cada paciente. Sin embargo, estos presentan gran variabilidad de lo predicho en el *setup* a lo conseguido una vez realizado el tratamiento. El objetivo de esta tesis es evaluar la eficacia y precisión en la predictibilidad de los alineadores en el movimiento de expansión. Se seleccionaron 100 pacientes tratados con cuatro marcas de alineadores diferentes: Angel Aligners®, Invisalign®, Spark® y HeySmile®. Se obtuvieron los modelos digitales en tres fases: STL inicial, STL final (antes del primer refinamiento) y set-up inicial. Se midieron los anchos de arcada de cúspide a cúspide entre caninos, premolares y primeros molares. Se realizó un análisis estadístico mediante el software SPSS versión 28.0 (IBM Corp, Chicago, Ill). La máxima precisión clínica la obtuvo Angel Aligners® a nivel de los primeros premolares inferiores con un 68,90%, al que le sigue Spark® en los primeros premolares inferiores con un 66,45%, HeySmile® en los segundos premolares inferiores con un 66% y, finalmente, Invisalign® obtuvo un 65,82% a nivel de los segundos premolares inferiores. Los alineadores son efectivos para efectuar movimientos transversales en ambas arcadas, siendo más predecibles a nivel de premolares inferiores y menos predecibles a nivel de caninos. La marca Angel Aligners® tiene diferencias estadísticamente significativas a nivel de premolares inferiores, pero en lo que se refiere a términos absolutos los porcentajes de predictibilidad son muy similares a Spark®, Invisalign® y HeySmile®.

PALABRAS CLAVE

Expansión transversal, alineadores invisibles, predictibilidad.

ABSTRACT

Aligners represent a therapeutic option in orthodontics, offering advantages such as aesthetics, comfort, and individualized prescriptions for each patient. However, the predictability of maxillary expansion is subject to variability. The objective of this thesis is to evaluate the efficacy and predictability of aligners in maxillary expansion. One hundred 17 adult patients were included in this study, divided into four groups, each assigned to a different brand of clear aligners: Angel Aligner®, Invisalign®, Spark® and HeySmile®. Digital 19 models were obtained at three stages: initial STL: initial (T1), prediction (T2) and final (T3) 20 (before the first refinement). The models were measured to obtain linear distances between canines, first bicuspid, second bicuspid and first molars. Statistical analysis was performed with 22 using SPSS 28.0. The best predictability was obtained in the lower arch (61.11% 23 against 57.12% in upper arch) for second bicuspid, while the worst accuracy was for ca-24 nines. Angel Aligner showed the highest percentage of predictability (58.88%) among the 25 brands evaluated, followed by HeySmile® with 59.89%, Spark® with 57.28% and Invisalign® 26 with 57.15%. Results showed that clear aligners are a viable treatment for 27 transversal movements for both arches. Although further research is needed to improve predictability-28 ity, clinicians should bear in mind the lower predictability when planning treatment.

KEYWORDS

Transverse expansion Clear aligners; predictability.

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Dr. Pedro Colino Gallardo, por creer en mí, por ser un referente en la ortodoncia a nivel mundial y haber dedicado gran parte de su tiempo en este trabajo, por esforzarse tanto para que sus alumnos entiendan la ortodoncia como la entiende él.

Al profesor Dr. Alfonso Alvarado por su paciencia, su sabiduría, la manera de implicarse y dedicarse ha sido verdaderamente excepcional.

Al profesor Dr. José Manuel Granero Marín por el apoyo durante todo el proceso.

A los Dr. Carlos Colino Paniagua, la Dra. Isabel Drewing y el Dr. Jony León por todo el esfuerzo realizado.

A mi madre, Gema, por su valor, coraje, estilo y apoyo incondicional a sus hijos.

A mi padre, Fernando por hacerme reflexionar en cada decisión.

A mi hermana, Elena, por ser una bella persona y la mejor hermana que uno pueda desear.

A mi mujer, Andrea, madre coraje y esposa ejemplar.

A mis hijos, Alejandro, Fernando y Alba, sois mi fuente de energía, por los que lucho y por quién me esfuerzo al máximo.

“A veces los pasos más firmes se dan con las piernas temblando”

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	7
I - INTRODUCCIÓN	27
1.1. Panorama general. de brackets a alineadores invisibles digitales.	27
1.1.1. Importancia clínica de la expansión dentoalveolar en adultos.	28
1.1.1.1. Biomecánica del movimiento transversal: tipping, staging y pérdida de expresión.	31
II - JUSTIFICACIÓN	37
2.1. Relevancia del estudio.	37
2.2. Carencia de estudios comparativos actualizados.....	38
III - OBJETIVOS	43
3.1. Objetivo general.....	43
3.2. Objetivos específicos.	43
3.3. Hipótesis.....	44
3.3.1. Hipótesis nula (H0).....	44
3.3.2. Hipótesis de trabajo (H1).....	44
IV - MATERIAL Y MÉTODO	47
4.1. Cálculo del tamaño de la muestra de participantes.....	47
4.2. Diseño del estudio.....	48
4.3. Análisis de modelos digitales.	48
4.4. Análisis de las medidas	52
4.5. Análisis estadístico	53
V - RESULTADOS	55
5.1. Características de los participantes	55

5.1.	Análisis del coeficiente de correlación inter clase (icc).	56
5.2.	Medidas de expansión combinada en los tres tiempos en n=100	58
5.3.	Comparación general entre marcas en los tres tiempos en n=100	62
5.3.1.	Tendencias de las medias de expansión por marca y tiempo.	64
5.3.2.	Comportamiento general por segmento transversal.	65
5.3.3.	Justificación para análisis posteriores.	66
5.4.	Comparación general entre marcas en los tres tiempos y por género. 67	
5.4.1.	Análisis detallado por segmentos, marca y género en T1, T2 y T3.....	69
5.4.2.	Estructura del análisis.	69
5.4.2.1.	Invisalign®.....	70
5.4.2.2.	Spark®.....	72
5.4.2.3.	Angel Aligner®.....	75
5.4.2.4.	HeySmile®.....	78
5.4.2.5.	Panel de barras verticales por marca y género.	82
5.5.	Prueba de independencia respecto a la marca N=100.	83
5.5.1.	Análisis detallado de la prueba de independencia.	84
5.5.1.1.	Diferencia T2 – T1 (Predicción vs Situación Inicial).....	84
5.5.1.2.	Diferencia T3 – T1 (Resultado final vs Situación Inicial).....	86
5.5.1.3.	Diferencia T3 – T2 (Resultado final vs Predicción)	87
5.5.1.4.	Análisis detallado de Bonferroni.	87
5.6.	Comparaciones múltiples	90
5.6.1.	Análisis por segmento y tiempo (T3 – T2).....	99
5.7.	Precisión clínica.	104
5.7.1.	Análisis por segmento y marca.....	105
5.7.2.	Promedio por arcada.	107
5.7.3.	Promedio general por marca.....	107
5.7.4.	Planificación.	108

VI -	DISCUSIÓN	111
6.1.	Eficacia y predictibilidad global de la expansión transversal con alineadores.....	111
6.1.1.	Contexto y problema clínico.	111
6.1.2.	Evidencia clínica y umbrales de referencia.	112
6.2.	Biomecánica y control del torque en la expansión con AT.....	114
6.2.1.	Biomecánica del movimiento transversal.....	114
6.2.2.	Influencia de la curva de Wilson y la inclinación coronal.	114
6.2.3.	Grosor y diseño del alineador.....	114
6.2.4.	Rol de attaches y configuraciones.....	115
6.2.5.	Evidencia de modelos FEA y estudios tridimensionales.	115
6.2.6.	Comparación con nuestro estudio.....	116
6.3.	Exactitud clínica vs eficacia, necesidad de sobre corrección y refinamientos.	118
6.3.1.	Discrepancia entre lo planificado y la realidad clínica.....	118
6.3.2.	Evidencia de estudios CBCT y análisis tridimensional.....	118
6.3.3.	Necesidad de sobre corrección y refinamientos.	118
6.3.4.	Validación del software de planificación.	119
6.3.5.	Evidencia en movimientos específicos y otros sistemas.	119
6.3.6.	Comparación con nuestro estudio.....	120
6.4.	Fiabilidad de las mediciones digitales y validez de los flujos cad/cam. 122	
6.4.1.	¿Por qué importa medir bien en expansión transversal?	122
6.4.2.	Reproductibilidad Inter método: manual vs digital vs apps.....	123
6.4.3.	Validez del enfoque cuspídeo y elección del software.....	123
6.4.4.	Desarrollo transversal y fiabilidad en series clínicas.....	124
6.4.5.	De la métrica a la predicción: El papel del “machine learning”	124

6.4.6.	¿Es imprescindible el modelo digital para todo?	124
6.4.7.	Encaje con nuestros resultados (ICC y error).....	125
6.5.	Pacientes en dentición mixta/adolescentes y comparación con RME/MARPE.	127
6.5.1.	Expansión en pacientes en crecimiento vs adultos.	127
6.5.2.	Estudios en dentición mixta y comparación con RME.	127
6.5.3.	Evidencia en expansión mixta con AT.....	128
6.5.4.	Técnicas esqueléticas: MARPE y SARPE.....	128
6.5.5.	Comparación con nuestro estudio.....	130
6.6.	Revisiones sistemáticas, scoping reviews y consensos.	132
6.6.1.	Síntesis de la evidencia acumulada: ¿Qué tan predecible es la expansión?.....	132
6.6.2.	¿Qué dicen las revisiones sobre sobre corrección y refinamientos?	132
6.6.3.	Hacia guías clínicas y consensos.....	133
6.6.4.	Heterogeneidad metodológica. Implicaciones para comparar estudios. 133	
6.6.5.	Mensaje integrador para la práctica clínica.....	133
6.7.	Materiales, fabricación y mantenimiento de los at. implicaciones clínicas en la predictibilidad.....	136
6.7.1.	Influencia del material en la biomecánica.	136
6.7.2.	Estrategias de mantenimiento y su impacto.	137
6.7.3.	Impacto clínico para la predictibilidad.....	137
VII -	CONCLUSIONES.....	141
VIII -	LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	145
8.1.	Limitaciones.....	145
8.2.	Futuras líneas de investigación.....	146
IX -	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151
X -	ANEXOS.....	158

SIGLAS Y ABREVIATURAS

AT, Alineadores Transparentes.

SE, Subexpansión.

RME, Rapid Maxillary Expansion (Expansión rápida del maxilar).

MARPE, Mini-implant Assisted Rapid Palatal Expansion (Expansión rápida asistida con microtornillos).

SARPE, Surgically Assisted Rapid Palatal Expansion (Expansión rápida palatina asistida quirúrgicamente)

STL, Standard Tessellation Language or Standard Triangle Language (Lenguaje de Teselación Estándar o Lenguaje de Triángulos Estándar).

FEA, Finite Element Analysis (Análisis por elementos finitos).

CBCT, Cone-Beam Computed Tomography (Tomografía de haz cónico).

Fan-RME, Apertura en forma de abanico, expande más en zona anterior, con poco efecto en molares.

PRISMA, Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses.

ATM, Articulación temporomandibular.

QoL, Quality of Life (Calidad de vida).

OJ, Overjet (Resalte horizontal).

OB, Overbite (Sobremordida).

RCT, Randomized Controlled Trial (Ensayo clínico aleatorizado.)

SEM, Scanning Electron Microscopy (Microscopía Electrónica de Barrido)

ÍNDICE DE FIGURAS, DE TABLAS Y DE ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Medición lineal 3D de AIC, A1PM, A2PM, AM superior.....	50
Figura 2. Medición lineal 3D de AIC. A1PM, A2PM y AM inferior	51
Figura 3. T3 - T2 Invisalign® por segmento y género N=25	72
Figura 4 T3 - T2 Angel Aligner® por segmento y género N=25	75
Figura 5. T3 - T2 Angel Aligner® por segmento y género N=25.....	78
Figura 6. T3 - T2 HeySmile® por segmento y género N=25.....	81
Figura 7. Panel vertical combinado por marca y género.	82
Figura 8. Panel vertical prueba de independencia respecto a la marca N=100	89
Figura 9. Panel vertical prueba de independencia Bonferroni N=100	89
Figura 11. Número de comparaciones significativas por marca.	103
Figura 10. Comparaciones significativas por segmento.	103
Figura 12. Clinical Accuracy.....	108
Figura 13. Estadios sutura media palatina.	129
Figura 14. Distribución de los estadios de maduración de la sutura media palatina	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de Expansión por arcada	33
Tabla 2. Porcentaje de marca y género.	55
Tabla 3. Media de edad y porcentaje de género.	56
Tabla 4. Coeficientes de Correlación Intraclase (ICC)	57
Tabla 5. Medidas de expansión combinada N=100 en los 3 tiempos T1, T2, T3.	60
Tabla 6. Comparación general entre marcas en los tres tiempos T1, T2 y T3 en N=100	64
Tabla 7. Comparación general entre marcas en los tres tiempos y por género.	69
Tabla 8. Figura 8. Prueba de independencia respecto a la marca.	84
Tabla 9. Comparaciones múltiples.	98
Tabla 10. SUP 13-23 T3-T2.	99
Tabla 11. SUP 14-24 T3-T2.	99
Tabla 12. SUP 15-25 T3-T2.	100
Tabla 13. SUP 16-26 T3-T2.	100
Tabla 14. INF 33-43 T3-T2.	101
Tabla 15. INF 34-44 T3-T2.	101
Tabla 16. INF 35-45 T3-T2.	102
Tabla 17. INF 36-46 T3-T2.	102
Tabla 18. Clinical Accuracy	105
Tabla 19. Cuadro comparativo- Evidencia clínica publicada sobre predictibilidad de expansión con AT.	113
Tabla 20. Cuadro comparativo- Biomecánica y control del torque en la expansión con AT.	117
Tabla 21. Cuadro comparativo - Exactitud clínica, sobrecorrección y refinamientos.	122
Tabla 22. Cuadro comparativo - Fiabilidad de mediciones digitales y validez CAD/CAM.	126

Tabla 23 -Cuadro comparativo - poblaciones en dentición mixta y comparación con RME/MARPE	131
Tabla 24- Cuadro comparativo. Revisiones, scoping y consensos.	135
Tabla 25- Cuadro comparativo. Materiales y mantenimiento de los AT.	138

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1- Comité de Ética de la UCAM.....	159
--	-----

I – INTRODUCCIÓN

I - INTRODUCCIÓN

1.1. PANORAMA GENERAL. DE BRACKETS A ALINEADORES INVISIBLES DIGITALES.

La ortodoncia contemporánea se encuentra en una etapa de profunda transformación impulsada por la transición de aparatos fijos a sistemas removibles, estéticos y digitalmente planificados. En este contexto los alineadores transparentes (AT) han adquirido un rol protagonista tanto en la práctica clínica como en la literatura científica, al ofrecer ventajas estéticas, higiénicas y biomecánicas frente a la aparatología convencional. Este proceso de modernización ha dado lugar a un nuevo modelo de práctica ortodóncica donde la digitalización, la simulación virtual y la automatización de movimientos han generado expectativas elevadas sobre la precisión y eficiencia terapéutica de los alineadores. Sin embargo, este mismo avance ha puesto de manifiesto la necesidad de evaluar críticamente hasta qué punto los sistemas digitalmente planificados reflejan la realidad biomecánica del movimiento dental, especialmente en situaciones clínicamente desafiantes como la expansión transversal. El ámbito general de este trabajo se enmarca en esta tensión entre potencial tecnológico y limitación biológica. Además, el creciente uso de estos dispositivos ha impulsado una revisión profunda sobre la verdadera capacidad de los alineadores de reproducir con fidelidad los movimientos programados, generando un marco clínico y científico en el que la predictibilidad se convierte en un eje central de análisis [1, 2, 3, 4].

La evolución de estos dispositivos, desde los primeros prototipos termo conformados hasta los sistemas actuales asistidos por inteligencia artificial y planificación 3D, ha sido ampliamente documentada. Las mejoras en la precisión del diseño digital, la incorporación del staging progresivo, el uso de ataches optimizados y la diversificación de materiales como poliuretanos multicapa han ampliado las posibilidades terapéuticas. En este punto, se vuelve necesario contextualizar un aspecto fundamental: el avance de la tecnología no siempre se traduce de manera directa en mejores resultados clínicos. El problema central radica en que las simulaciones virtuales representan modelos geométricos ideales que no consideran plenamente las variaciones anatómicas ni la resistencia

biomecánica del hueso alveolar adulto. Por tanto, aunque la planificación digital ha alcanzado un alto grado de sofisticación, su capacidad para prever la respuesta real de los tejidos sigue siendo limitada. Este contraste define el marco conceptual en el que se sitúa el análisis de la predictibilidad de la expansión. De hecho, la sofisticación de los sistemas ha ampliado la diversidad de opciones terapéuticas, pero también ha generado diferencias significativas entre la eficacia teórica y la eficacia real, especialmente en movimientos tridimensionales de alta demanda biomecánica [5, 6, 7, 8, 9].

Sin embargo, a pesar del desarrollo tecnológico, estudios recientes advierten sobre una limitación persistente: la imprevisibilidad parcial de algunos movimientos dentales complejos, especialmente aquellos que involucran rotaciones, extrusiones y de manera destacada, la expansión transversal. La expansión transversal constituye un movimiento clave para comprender el ámbito del presente análisis, ya que representa uno de los retos biomecánicos más complejos enfrentados por los alineadores. Su estudio permite clarificar una cuestión fundamental: qué tan eficaz es la transmisión real de fuerzas laterales en comparación con lo que propone el software de planificación. La discrepancia entre el movimiento planificado (T2) y el obtenido (T3) se ha convertido en un indicador crucial para evaluar si la eficiencia tecnológica es suficiente o si persisten limitaciones biomecánicas estructurales que deben ser contempladas y cuantificadas. Así, la expansión transversal permite ilustrar de manera clara la brecha entre virtualidad y realidad clínica, lo que convierte su análisis en una referencia central para cualquier evaluación de predictibilidad [10, 11, 12].

1.1.1. Importancia clínica de la expansión dentoalveolar en adultos.

La expansión dentoalveolar, entendida como el ensanchamiento del arco mediante el desplazamiento lateral de las piezas dentales sin alterar estructuras esqueléticas, se ha convertido en una herramienta fundamental para el tratamiento

ortodóncico conservador en adultos. En muchos casos esta alternativa permite evitar extracciones o tratamientos quirúrgicos, mejorando la estética transversal y la función oclusal. Esto establece un punto clínico clave en los antecedentes del problema: la expansión dentoalveolar representa la única vía biomecánicamente viable para ampliar el arco en adultos sin recurrir a procedimientos invasivos, por lo que entender sus posibilidades y limitaciones se vuelve esencial para diseñar tratamientos seguros y previsibles. El ámbito de aplicación (pacientes adultos con crecimiento completado), implica que la expansión se obtendrá mayoritariamente por inclinación dental, no por modificación esquelética. Esto define el escenario clínico donde se originan las discrepancias entre T2 y T3. Dado su impacto funcional y estético, su uso se ha consolidado como una herramienta terapéutica estratégica que requiere planificación precisa y evaluación individualizada [13, 14, 15].

Dado que en adultos las suturas palatinas se encuentran en la mayoría de los casos cerradas, la posibilidad de una expansión esquelética significativa es limitada si no se recurren a métodos más agresivos. Por ello, el objetivo se centra en la expansión dentoalveolar, la cual se logra mediante la inclinación vestibular de las piezas dentales con una mínima participación de translación radicular. La biomecánica particular del adulto condiciona la predictibilidad. Aquí es donde se concentra el núcleo del problema: la falta de respuesta de la apertura de la sutura media palatina y el predominio de la inclinación coronaria limitan la traslación radicular y aumentan la probabilidad de que el movimiento real se exprese de manera incompleta. Este fenómeno es altamente relevante para definir el alcance clínico de los alineadores en expansión: si el movimiento real depende del tipping, la predictibilidad disminuye y el riesgo aumenta. Este marco contextual delimita la realidad clínica en la que se desarrolla el problema de investigación. Esta condición implica que la expansión obtenida será proporcional a la capacidad del hueso alveolar para remodelarse, condicionando significativamente la magnitud y la estabilidad del movimiento. [16, 17, 18].

Esta estrategia, aunque efectiva en términos de resultados visibles, no está exenta de riesgos. Bruni & cols [19] señalan que cuando la expansión supera los 2-3 mm por hemiarcada existe un aumento significativo del riesgo periodontal debido a la posible dehiscencia o fenestración ósea. De La Rosa Gay & cols [20] por su parte, subrayan que la predictibilidad de estos movimientos está fuertemente condicionada por la morfología ósea basal y la salud gingival. La aparición del riesgo periodontal marca otro elemento crítico en los antecedentes: el movimiento expansivo no solo tiene límites mecánicos, sino también biológicos. Exceder la capacidad del hueso alveolar para alojar una raíz genera complicaciones clínicas que obligan a replantear la magnitud de la expansión y a valorar cuidadosamente la biomecánica planificada. Este conjunto de factores define el ámbito de seguridad clínica y delimita la viabilidad real de la expansión dentoalveolar en adultos. Por tanto, la expansión debe planificarse con criterios de prudencia que integren anatomía radicular, espesor alveolar y biotipo periodontal para evitar complicaciones.

En pacientes pediátricos o adolescentes, algunos estudios han mostrado resultados prometedores con la expansión mediante alineadores en dentición mixta, con efectos incluso comparables a los obtenidos mediante disyuntores convencionales, [21]. Sin embargo, en pacientes adultos donde los efectos esqueléticos son marginales, el movimiento se limita casi exclusivamente de manera dentoalveolar. Esta distinción entre edades es crucial para acotar el ámbito de estudio. Mientras en jóvenes la expansión puede incorporar componentes esqueléticos, en adultos se circunscribe al alveolo, lo que convierte la predictibilidad en un parámetro decisivo para determinar el éxito terapéutico. El ámbito de la tesis se centra precisamente en el adulto, donde las limitaciones biomecánicas son más evidentes y los alineadores enfrentan mayores desafíos para expresar completamente la expansión planificada [22].

1.1.1.1. *Biomecánica del movimiento transversal: tipping, staging y pérdida de expresión.*

Numerosos estudios han demostrado que la mayor parte del efecto expansivo logrado con alineadores se debe a la inclinación vestibular (tipping) en lugar de un desplazamiento real de la raíz (torque o traslación). Esto limita tanto la magnitud del movimiento clínicamente alcanzable como su estabilidad a largo plazo. La mecánica del tipping representa el punto de origen de la pérdida de predictibilidad. Dado que el alineador transmite la mayor parte de la fuerza a nivel coronario, la raíz se mueve menos de lo previsto, creando discrepancias entre el resultado real y el diseño digital. Este hecho constituye el fundamento biomecánico de la brecha T2-T3 y define el problema central que debe analizarse. Además, esta dinámica compromete la estabilidad del movimiento y aumenta el riesgo de retrocesos, lo que obliga al clínico a prever márgenes adecuados de compensación [23, 24].

En uno de los primeros estudios cuantitativos, Houle & cols [25] calcularon una predictibilidad media del 49% en expansión con Invisalign® con diferencias importantes entre caninos, premolares y molares. Kravitz & cols [26] informaron una efectividad aún menor, del 41% en ciertos sectores anteriores. Estos hallazgos fueron revisados por Haouilli & cols [27] quienes observaron una mejora con predictibilidades promedio del 57% en el arco superior y 61% en el arco inferior. Esta variabilidad entre sectores y entre estudios muestra que el problema no solo es biomecánico, sino también sistemático: diferentes dientes presentan diferentes niveles de expresividad y los alineadores no actúan de forma homogénea a lo largo del arco. Este elemento define claramente el alcance del análisis: la predictibilidad depende del diente, de la posición en el arco y del material, configurando un problema multidimensional. Estas cifras reflejan avances significativos pero también evidencian que, incluso con mejoras, la disparidad entre lo planificado y lo obtenido sigue siendo clínicamente relevante.

Datos recientes, como los publicados por Tien & cols [28], muestran que incluso con materiales mejorados y staging optimizado, la diferencia entre lo planificado y lo obtenido persiste en rangos del 55-60%. Rocha & cols [13] y Gallucio & cols [14] analizaron modelos digitales pre y post tratamiento

demostrando que la discrepancia entre T2 (setup) y T3 (resultado real) se acentúa en los sectores posteriores. La zona posterior del arco representa el mayor desafío biomecánico, lo que delimita con claridad el ámbito de mayor pérdida de predictibilidad. Esto permite estructurar un análisis específico centrado en las dificultades propias de caninos, premolares y especialmente molares, donde la expresión del movimiento expansivo es menor y la variabilidad más alta. Este patrón define los sectores anatómicos de interés en el estudio. De este modo, los hallazgos recientes consolidan la idea de que la predictibilidad disminuye gradualmente hacia los segmentos distales del arco.

El diseño del atache también influye significativamente. Castroflorio & cols [6] documentaron que los ataches rectangulares o de torque correctamente orientados mejoran la expresión del movimiento, aunque no eliminan completamente la pérdida de precisión. Además, Shahabuddin & cols [29] demostraron que el material, el grosor y la flexibilidad del alineador afectan el resultado final, con mejores tasas de expresión en los sistemas multicapa como Spark® y Angel Aligner®. Estas variaciones entre materiales y algoritmos ponen de manifiesto que el problema de predictibilidad no es homogéneo entre marcas, lo que justifica comparaciones específicas entre sistemas. El ámbito de estudio incluye así la necesidad de identificar qué marcas muestran mayor expresión real del movimiento transversal y en qué condiciones, ofreciendo una perspectiva comparativa esencial para la práctica clínica. La combinación de materiales optimizados y geometrías de atache bien diseñadas ofrece mejoras considerables, aunque no elimina las limitaciones biomecánicas subyacentes.

En resumen, la expansión con alineadores transparentes es clínicamente posible, pero su predictibilidad sigue siendo limitada, lo que obliga a planificar sobrecorrecciones o a considerar refinamientos posteriores. Este conjunto de evidencias resume el problema central: existe una diferencia sistemática entre lo planificado digitalmente y lo que se obtiene clínicamente en pacientes adultos. Este desajuste constituye el núcleo conceptual del análisis y define tanto el ámbito clínico como el científico del estudio, estableciendo la necesidad de cuantificar y estudiar dichas discrepancias con rigor. Por ello, el abordaje del movimiento expansivo requiere criterios basados en evidencia que permitan anticipar pérdidas de expresión y desarrollar estrategias más eficientes de planificación y ejecución. [30, 31].

<i>Marca</i>	<i>Mecanismo principal de expansión</i>	<i>Tipo de ataches usados</i>	<i>Frecuencia de cambio de alineador</i>
<i>Angel Aligner®</i>	<i>Sistema dual (7 días flexible + 3 firmes) que genera tip crown controlado</i>	<i>Ataches rectangulares personalizados</i>	<i>Cambio cada 10 días</i>
<i>Invisalign®</i>	<i>Planificación con ClinCheck y ataches optimizados; rigidez progresiva del plástico</i>	<i>Ataches troquelados y cortes programados</i>	<i>Cambio cada 7–14 días</i>
<i>Spark®</i>	<i>Material exclusivo de alta rigidez y algoritmos adaptativos</i>	<i>Ataches finos y compensadores vestibulares</i>	<i>Cambio cada 7 días</i>
<i>HeySmile®</i>	<i>SLA digital con doble capa; algoritmo de staging intercalado</i>	<i>Ataches triangulares y cortes locales</i>	<i>Cambio cada 10-12 días</i>

Tabla 1. Mecanismos de Expansión por arcada

II – JUSTIFICACIÓN

II - JUSTIFICACIÓN

2.1. RELEVANCIA DEL ESTUDIO.

La expansión dentoalveolar representa un pilar terapéutico en la corrección de discrepancias transversales leves y moderadas especialmente en paciente adultos no susceptibles de expansión esquelética sin intervención quirúrgica. Su correcta aplicación puede evitar extracciones dentales innecesarias, mejorar la alineación sin comprometer la estética facial y ampliar el corredor bucal, contribuyendo así a una sonrisa más armónica y estable [32].

En la ortodoncia contemporánea el uso de alineadores transparentes ha crecido exponencialmente debido a su estética, comodidad y posibilidad de planificar cada fase de tratamiento mediante software de simulación 3D. No obstante, el movimiento de expansión transversal, a diferencia de otros como la extrusión o la rotación, presenta un comportamiento biomecánico complejo al involucrar una combinación de desplazamiento vestibular, torque controlado e interacción con el hueso alveolar [33].

La predictibilidad de este movimiento es de suma importancia ya que una expansión subestimada puede generar apiñamiento residual o recidiva, mientras que una expansión sobreestimada puede inducir efectos colaterales como dehiscencias óseas, pérdida de inserción, inclinaciones excesivas o inestabilidad postratamiento. Además, la precisión en la ejecución de este movimiento determina la necesidad de fases de refinamiento adicionales, lo cual impacta directamente en la duración del tratamiento, la satisfacción del paciente y los costos clínicos.

Actualmente, muchos softwares de alineadores predicen el movimiento de expansión como un desplazamiento lineal desde los puntos de contacto de las coronas sin modelar adecuadamente los efectos tridimensionales del torque, tip y la adaptación ósea del periodonto. Esta simplificación biomecánica puede traducirse en una discordancia clínicamente significativa entre el setup virtual y el

resultado final, sobre todo en molares y premolares, donde la resistencia ósea vestibular es mayor y el momento de fuerza generado por el alineador es menor.

Por tanto, evaluar científicamente cuan precisa es la predicción que realiza cada marca de alineadores en cuanto al movimiento de expansión es una necesidad clínica prioritaria, particularmente en la práctica con adultos donde la expansión ósea está limitada y el movimiento dentario requiere control biomecánico riguroso. Esta investigación se centra en ese objetivo, integrando datos clínicos reales y análisis estadístico multivariado [32, 33].

2.2. CARENCIA DE ESTUDIOS COMPARATIVOS ACTUALIZADOS.

A pesar del auge de los alineadores transparentes y su amplia adopción clínica, la literatura científica presenta importantes vacíos en cuanto a estudios comparativos actualizados que analicen la predictibilidad de los movimientos ortodóncicos, en especial la expansión dentoalveolar, entre diferentes marcas comerciales.

La mayoría de los estudios disponibles se han centrado históricamente en Invisalign® dada su antigüedad en el mercado y su sistema de planificación Clinchek®. Sin embargo, marcas más recientes como Spark®, Angel Aligner®, y HeySmile® han incorporado materiales alternativos, algoritmos de staging distintos y nuevas configuraciones de attaches, lo que podría afectar significativamente la biomecánica del tratamiento. No obstante, no existen suficientes estudios independientes, clínicos y controlados que comparen estos sistemas entre sí bajo condiciones metodológicamente equivalentes [34].

Además, muchas investigaciones previas han empleado criterios poco homogéneos, como diferencias en la edad de los pacientes, número de alineadores, número de refinamientos o métodos de medición 2D basado en modelos de yeso, lo cual dificulta su comparación o extrapolación a la práctica clínica moderna. En contraste, la presente tesis utiliza modelos digitales STL y programas de medición específicos como Exocad® y los propios de los alineadores, garantizando una medición precisa, tridimensional y cuantificable de las discrepancias entre la predicción (T2) y el resultado clínico final (T3) [35].

Otra limitación frecuente en los estudios existentes es la falta de validación cruzada mediante análisis multivariado. Algunos trabajos presentan diferencias estadísticamente significativas, pero carecen de ajuste por variables de confusión como el sexo, el tipo de maloclusión o la edad ósea del paciente. Este trabajo incorpora dichas variables mediante análisis de regresión y pruebas no paramétricas, aumentando la validez interna y externa de los hallazgos.

En síntesis, existe una necesidad urgente de generar evidencia científica sólida, moderna y comparativa sobre la eficacia real de las distintas marcas de alineadores en la expansión dentoalveolar. Esta tesis responde directamente a dicha necesidad, posicionándose como una investigación de alto valor clínico, con potencial para influir en la toma de decisiones de los ortodoncistas y en las estrategias de desarrollo futuro por parte de las compañías de alineadores.

III – OBJETIVOS

III - OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL.

Evaluar y comparar la precisión de la predictibilidad del movimiento de expansión dentoalveolar en pacientes tratados con cuatro sistemas diferentes de alineadores transparentes (Angel Aligner®, HeySmile®, Spark® e Invisalign®) mediante el análisis tridimensional de modelos digitales superpuestos con el fin de establecer el grado de concordancia entre la planificación virtual (T2) y los resultados clínicos reales obtenidos al finalizar el tratamiento (T3).

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar la discrepancia entre el movimiento planificado (T2) y el movimiento clínicamente logrado (T3) en expansión transversal para cada sistema de alineadores.
- Comparar estadísticamente la predictibilidad de los distintos sistemas de alineadores en términos de precisión clínica.
- Analizar el comportamiento del movimiento de expansión en diferentes sectores anatómicos (caninos, premolares y molares).
- Evaluar la influencia del sexo del paciente en la precisión del movimiento de expansión.
- Determinar la frecuencia y magnitud de sobrecorrecciones necesarias para lograr la expansión prevista en cada sistema.
- Validar los resultados mediante análisis estadístico multivariado, incluyendo pruebas no paramétricas.

3.3. HIPÓTESIS.

3.3.1. Hipótesis nula (H_0)

No existen diferencias estadísticamente significativas en la predictibilidad del movimiento de expansión dentoalveolar entre lo planificado y el resultado real obtenido de los cuatro sistemas de alineadores estudiados.

3.3.2. Hipótesis de trabajo (H_1)

Existen diferencias estadísticamente significativas en la predictibilidad del movimiento de expansión dentoalveolar entre lo planificado y el resultado real obtenido de los cuatro sistemas de alineadores estudiados.

IV - MATERIAL Y MÉTODO

IV -MATERIAL Y MÉTODO

4.1. CÁLCULO DEL TAMAÑO DE LA MUESTRA DE PARTICIPANTES.

La muestra inicial consistió en 100 pacientes adultos (60 mujeres y 40 hombres) con edades entre 21 y 49 años ($35,60 \pm 7,02$ en Invisalign®, $32,52 \pm 5,33$ en Spark®, $33,24 \pm 6,12$ en Angel Aligner® y $32,64 \pm 5,11$ en HeySmile®). Todos los pacientes fueron diagnosticados con maloclusión transversal con necesidad de expansión dentoalveolar en el plan de tratamiento con alineadores. Se formaron cuatro grupos homogéneos, cada uno correspondiente a una de las cuatro marcas comerciales de alineadores a analizar. Cada conjunto incluyó 25 pacientes tratados con Angel Aligners®, Invisalign®, Spark® y HeySmile®) respectivamente. De esta manera, cada grupo aportó una cuarta parte de la muestra total. Los criterios de inclusión fueron los siguientes:

- Dentición permanente completa.
- Ausencia de crecimiento.
- Tratamiento exclusivo con alineadores.
- Necesidad de expansión transversal en ambas arcadas.
- Registros completos de todos los pacientes.
- Tratamientos que necesiten usar 15 alineadores como mínimo en la primera fase.
- Uso de alineadores consistente y sin modificaciones planificadas a mitad de tratamiento.

Los criterios de exclusión incluyeron apiñamiento severo (discrepancia entre el tamaño del diente y la longitud de la arcada superior a -5 mm), pacientes con enfermedad periodontal y casos que requirieron extracciones.

Este estudio fue llevado a cabo de acuerdo con los estándares éticos determinados por la Declaración de Helsinki y el protocolo fue aprobado por el Comité de Bioética de la UCAM (CE052406). Todos los pacientes que participaron en el estudio fueron informados sobre los procedimientos a realizar y firmaron un consentimiento informado para mostrar su aprobación. [Anexo 1 y 2].

4.2. DISEÑO DEL ESTUDIO.

En este estudio clínico longitudinal, todos los pacientes recibieron el tratamiento conforme al protocolo estándar de cada sistema de alineadores. Al inicio de la terapia (T1) se realizaron escaneos intraorales de la arcada superior e inferior utilizando un escáner digital iTero® (Align Technology, San José, CA, USA). Las impresiones digitales fueron realizadas por un único operador entrenado, siguiendo las recomendaciones del fabricante para garantizar la uniformidad. Tras enviar el STL a la marca elegida para cada paciente, se realizó la planificación digital del caso en las plataformas ClinCheck®, Approver®, iOrtho® o HeySmile® Studio® respectivamente. Este segundo STL (T2) se comparó con T1 para hallar lo predicho. Una vez recibidos los alineadores se colocaron los ataches de composite necesarios utilizando las plantillas proporcionadas por cada compañía. El protocolo de cementado de ataches fue uniforme para todos los casos. De este modo, se aseguró una colocación reproducible y precisa de los ataches en todos los pacientes, optimizando la retención del alineador y la expresión de los movimientos planificados. Se cementaron los ataches de ambas arcadas en la misma sesión, se realizó una profilaxis de la superficie dental y se acondicionó el esmalte con ácido grabador al 37% (Ultra Etch IndiSpense, Ultradent Products Inc., South Jordan, UT, USA) durante 15 segundos, seguido de un enjuague abundante y secado. Se colocaron rollos de algodón para controlar la humedad y se colocó adhesivo Transbond Plus Self Etching Primer (3M Unitek®, Monrovia, CA, USA). La plantilla de ataches se rellenó con resina compuesta nano híbrida Tetric EvoCeram (Ivoclar Vivadent®, Schaan, Liechtenstein) y se fotopolimerizó durante 30 segundos por atache. Al finalizar la primera fase activa de alineadores se retiraron los alineadores y se obtuvieron nuevamente escaneos intraorales de ambas arcadas con el mismo equipo (T3). Este tercer STL se comparó con T1 para hallar lo conseguido, es decir, el movimiento que cada diente ha realizado tras el tratamiento. Todos los pacientes completaron la primera fase de alineadores, por lo que T3 representa el resultado de dicha fase.

4.3. ANÁLISIS DE MODELOS DIGITALES.

Para cada paciente se obtuvieron modelos maxilares y mandibulares al inicio del tratamiento (modelo pretratamiento o T1), en el paso final de la planificación

digital (modelo de referencia o T2) y al final de la primera serie de alineadores (modelo final o T3). En total se analizaron 600 modelos, 200 en T1, 200 en T2 y 200 en T3. Cada modelo se importó y analizó en Exocad® (GmbH, Darmstadt, Alemania).

Se definieron distancias transversales entre puntos anatómicos correspondientes de cada hemiarcada:

- Anchura inter-canina (AIC): distancia lineal entre las cúspides de los caninos.
- Anchura inter-premolar del primer premolar (A1P): distancia lineal entre las cúspides vestibulares de los primeros premolares.
- Anchura inter-premolar del segundo premolar (A2P): distancia lineal entre las cúspides vestibulares de los segundos premolares.
- Anchura inter-molar (AM): distancia lineal entre las cúspides mesio-vestibulares de los primeros molares.

Estas mediciones se realizaron trazando una línea recta en el espacio 3D de los tres modelos. Por lo tanto, para cada paciente se obtuvieron 24 valores: ancho inicial (T1), ancho planificado (T2) y ancho obtenido (T3) de IC, A1P, A2P y AM en la arcada superior e inferior. Todas las mediciones fueron efectuadas por un único examinador.

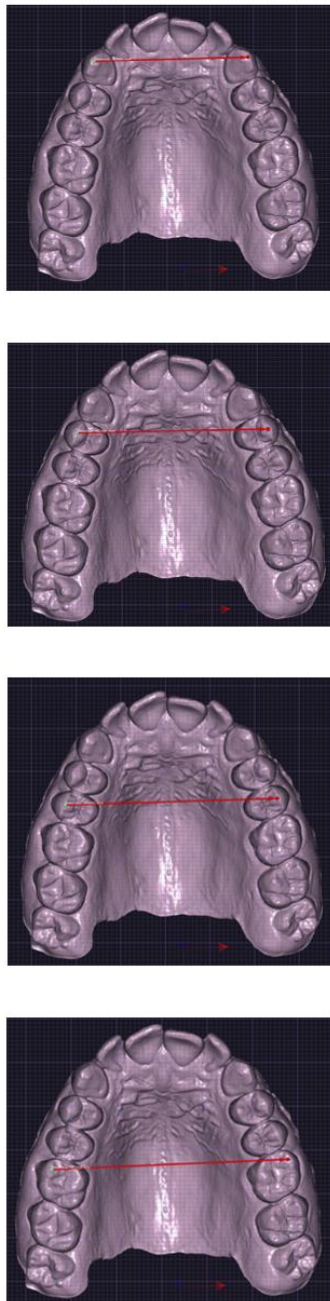


Figura 1. Medición lineal 3D de AIC, A1PM, A2PM, AM superior.

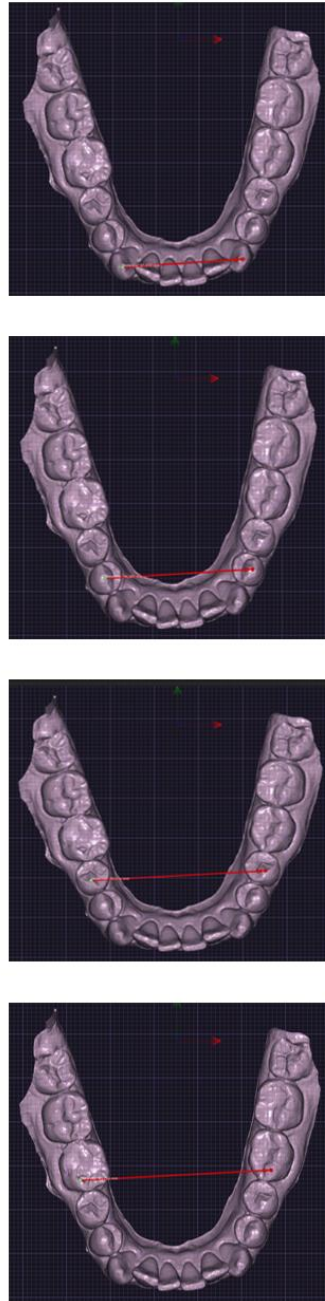


Figura 2. Medición lineal 3D de AIC. A1PM, A2PM y AM inferior

4.4. ANÁLISIS DE LAS MEDIDAS

Tras obtener los valores se analizaron los siguientes datos.

- Expansión predicha: diferencia entre el set-up planificado digitalmente y el modelo inicial.

$$\text{Predicción} = |T2 - T1|$$

- Expansión conseguida: diferencia entre el modelo final tras el tratamiento y el modelo inicial.

$$\text{Tratamiento} = |T3 - T1|$$

- Precisión: diferencia entre el movimiento conseguido y prescrito, expresado como valor absoluto y porcentaje (%).

$$\text{Precisión} = \left| \frac{T3 - T1}{T2 - T1} \right| \times 100$$

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Finalmente, los análisis estadísticos se realizaron utilizando el software SPSS Statistics v28.0 (IBM® Corp., Armonk, NY, USA). Se obtuvieron las medidas y desviaciones estándar de las medidas de anchura de arcada para cada tipo de diente, arcada y tiempo (T1, T2 y T3). La normalidad de datos fue verificada mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Dado que ninguna variable mostró desviaciones significativas de la normalidad ($p > 0,05$), se aplicaron métodos estadísticos paramétricos.

Se empleó la prueba t de Student para datos pareados al comparar las medidas planificadas contra las obtenidas dentro de cada grupo y para datos independientes al comparar diferencias entre dos grupos distintos. Para comparar simultáneamente las cuatro marcas de alineadores en cuanto a magnitud de expansión lograda o porcentaje de predictibilidad, se utilizó un ANOVA de un factor. En todos los análisis se utilizó un nivel de significación $p=0,05$ (intervalo de confianza del 95%). Adicionalmente, se calculó la predictibilidad clínica (%) como el porcentaje de la expansión obtenida respecto a la planificada para cada diente y sistema de alineadores.

V – RESULTADOS

V - RESULTADOS

5.1. CARACTERÍSTICAS DE LOS PARTICIPANTES

La muestra estuvo compuesta por 100 pacientes adultos (60 mujeres y 40 hombres) de entre 21 y 49 años con maloclusión transversal tratados con expansión dentoalveolar mediante alineadores. Se hicieron cuatro grupos equitativos correspondientes a las cuatro marcas.

La muestra dilucidó una ligera mayor representación femenina, especialmente en el grupo de Invisalign®, con un 72% de mujeres. Las edades medias fueron similares entre grupos, oscilando entre los 32,5% y los 35,6 años, sin diferencias extremas que condicionen el análisis posterior.

Marca	Edad media (años± DT)	Hombres (%)	Mujeres (%)
Invisalign®	35,60 ± 7,02	28,0%	72,0%
Spark®	32,52 ± 5,33	44,0%	56,0%
Angel Aligner®	33,24 ± 6,12	44,0%	56,0%
HeySmile®	32,64 ± 5,11	44,0%	56,0%

Tabla 2. Porcentaje de marca y género.

		N (%)
GÉNERO	HOMBRE	40 (40,0%)
	MUJER	60 (60,0%)
MARCA	INVISALIGN	25 (25,0%)
	SPARK	25 (25,0%)
	ANGEL ALIGNER	25 (25,0%)
	HEYSMILE	25 (25,0%)

Tabla 3. Media de edad y porcentaje de género.

5.1. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN INTER CLASE (ICC).

El coeficiente de correlación intraclase (ICC) es una herramienta estadística que mide el grado de concordancia o fiabilidad entre dos o más mediciones. En este contexto se utiliza para evaluar cuán consistente es la planificación virtual (T2) respecto a la medición inicial (T1), lo cual no busca medir la precisión del tratamiento, sino detectar posibles errores sistemáticos en la predicción inicial, como planificaciones excesivamente ambiciosas o conservadoras.

Segmento	ICC (T1 vs T2)
SUP-13-23	0,845
SUP-14-24	0,877
SUP-15-25	0,906
SUP-16-26	0,952
INF-33-43	0,736
INF-34-44	0,835
INF-35-45	0,899
INF-36-46	0,903

Tabla 4. Coeficientes de Correlación Intraclass (ICC)

Esta tabla presenta los coeficientes de correlación intraclass (ICC) obtenidos al comparar las medidas iniciales (T1) con las predicciones generadas por los softwares de las marcas de alineadores (T2) a nivel de caninos, premolares y molares superiores e inferiores.

Según la clasificación propuesta por Koo & Li en 2006 los valores pueden interpretarse de la siguiente manera:

- $ICC < 0.50$ = fiabilidad pobre.
- $0.50 \leq ICC < 0.75$ = fiabilidad moderada.
- $0.75 \leq ICC < 0.90$ = fiabilidad buena.
- $ICC > 0.90$ = fiabilidad excelente.

Aplicando esta escala a los datos de la tabla:

- Todos los ICC se encuentran entre 0.855 y 0.962.
- Los segmentos (SUP 15-25, SUP 16-26 e INF 36-46), muestran coeficientes superiores a 0.90 lo que indica una concordancia de excelente fiabilidad.
- Los segmentos (SUP 13-23, SUP 14-24, INF 34-44 e INF 35-45), muestran coeficientes entre 0.75 y 0.90 lo que indica una concordancia de buena fiabilidad.
- El segmento INF 33-43 es el único que indica una concordancia de moderada fiabilidad.

Estos resultados sugieren que la predicción del movimiento de expansión transversal mediante software de alineadores muestra una elevada concordancia con la situación inicial, lo cual es crucial para establecer expectativas clínicas realistas y reducir la necesidad de refinamientos posteriores.

Es importante destacar que, para evaluar correctamente las ICC, Koo & Li [64] recomiendan especificar el modelo estadístico utilizado (efectos aleatorios o mixtos), el tipo de medición (única o promedio) y la definición de concordancia aplicada (consistencia vs acuerdo absoluto).

En este estudio se empleó el modelo adecuado para comparación de medidas intra-sujeto con análisis por pares.

Estos hallazgos apoyan la validez del software de planificación digital en ortodoncia, especialmente en relación con la predicción de la expansión transversal.

5.2. MEDIDAS DE EXPANSIÓN COMBINADA EN LOS TRES TIEMPOS EN N=100

	Mean	SD
SUP-13-23-T1	32,97	±2,56

SUP-13-23-T2	35,75	$\pm 2,28$
SUP-13-23-T3	34,39	$\pm 2,37$
SUP-14-24-T1	39,65	$\pm 3,48$
SUP-14-24-T2	43,20	$\pm 2,83$
SUP-14-24-T3	41,77	$\pm 3,15$
SUP-15-25-T1	44,47	$\pm 4,16$
SUP-15-25-T2	47,82	$\pm 3,79$
SUP-15-25-T3	46,58	$\pm 3,62$
SUP-16-26-T1	49,75	$\pm 4,63$
SUP-16-26-T2	52,53	$\pm 4,24$
SUP-16-26-T3	51,27	$\pm 4,36$
INF-33-43-T1	24,77	$\pm 2,25$
INF-33-43-T2	27,06	$\pm 2,41$
INF-33-43-T3	26,06	$\pm 2,01$
INF-34-44-T1	32,01	$\pm 3,40$

INF-34-44-T2	35,16	±2,56
INF-34-44-T3	34,06	±2,71
INF-35-45-T1	37,45	±3,96
INF-35-45-T2	40,81	±3,26
INF-35-45-T3	39,59	±3,44
INF-36-46-T1	42,67	±4,71
INF-36-46-T2	45,45	±3,47
INF-36-46-T3	44,33	±3,89

Tabla 5. Medidas de expansión combinada N=100 en los 3 tiempos T1,T2,T3.

En la Tabla nº 6 se observan las medidas transversales promedio de la muestra total N=100 en cada tiempo evaluado.

Las tendencias generales indican que todos los segmentos dentoalveolares presentan una expansión desde T1 hasta T3 aunque la magnitud de la expansión lograda (T3 – T1) es sistemáticamente menor que la expansión predicha por el software (T2 – T1). En otras palabras, el ancho transversal aumentó clínicamente con los alineadores entre el inicio y el final del tratamiento, pero no se alcanzó completamente la amplitud pronosticada por el software en ninguno de los segmentos.

En todos los segmentos tanto superiores como inferiores la expansión real resultó menor entre 1mm y 1,43 mm que la expansión planificada en N= 100. Esto evidencia una discrepancia constante entre el resultado clínico y la predicción.

En la muestra total se observó una expansión transversal significativa en todos los niveles (canino, premolar y molar) tras el tratamiento con alineadores con incrementos medios entre 1,42mm y 2,14mm

En términos de magnitud, las mayores expansiones transversales se observaron en la región de los premolares tanto superiores como inferiores, mientras que en la región inter canina y en la zona molar la expansión fue algo menor. En el arco superior el incremento medio Inter premolar SUP 14-24 fue de 2,12mm comparado con el inter canino SUP 13-23 de 1,42mm y el inter molar SUP 16-26 de 1,52mm.

De la misma forma análoga en el arco inferior el ancho entre segundos premolares INF 35-45 aumento a 2,14 mm frente al inter canino INF 33-43 que fue de 1,29mm y el inter molar INF 36-46 que fue de 1,66 mm.

Esta distribución sugiere que el tratamiento produjo una expansión en forma de arco más amplio en la zona premolar, respetando en parte la anatomía en caninos y las limitaciones en molares. Es decir, el arco dental se ensanchó preferentemente en su parte media, lo que concuerda con patrones biomecánicos esperables.

Desde la perspectiva de la relevancia clínica, estos hallazgos aportan información valiosa para la práctica ortodóncica con alineadores transparentes. En primer lugar, el hecho de que se hayan logrado expansiones transversales significativas (1,42 mm a 2,14 mm) indica que los alineadores son eficaces para ampliar arcadas dentro de un rango moderado. Una expansión de 2 mm por segmento puede contribuir a mejorar la forma del arco, ganar espacio para el alivio de apiñamientos leves y moderados y mejorar la coordinación transversal entre arcadas.

No obstante, la diferencia consistente (entre 1 mm y 1,42 mm entre la expansión predicha y la obtenida es clínicamente importante. Un desfase de 1mm en cada dimensión transversal puede suponer, por ejemplo, que el espacio ganado o la corrección obtenida no alcancen completamente lo planificado pudiendo dejar ligeros remantes de discrepancia.

En la muestra total se observó una expansión transversal significativa en todos los niveles (canino, premolar y molar) tras el tratamiento con alineadores con incrementos entre 1,42 mm y 2,14 mm. La expansión lograda fue algo menor que la esperada por el software aproximadamente un 60-70% de la predicción quedando 1mm por debajo pero aun así uniforme y clínicamente notable.

Pese a esa discrepancia, el patrón de expansión fue coherente (mayor apertura en premolares que en caninos o molares) y la variabilidad inter paciente se redujo tras el tratamiento, lo que indica que los alineadores produjeron cambios consistentes en la forma del arco.

5.3. COMPARACIÓN GENERAL ENTRE MARCAS EN LOS TRES TIEMPOS EN N=100

MARCA									
						ANGEL			
TIEMPO		INVISALIGN		SPARK		ALIGNER		HEYSMILE	
T1	SUP-13-23	32,18	±2,11	33,65	±3,09	33,48	±2,31	32,58	±2,50
	SUP-14-24	38,06	±2,99	40,86	±4,16	40,44	±2,84	39,23	±3,24
	SUP-15-25	42,90	±3,53	46,14	±4,65	45,59	±3,60	43,26	±4,02
	SUP-16-26	48,62	±3,56	51,27	±5,60	51,24	±3,90	47,87	±4,43

T2	INF-	24,07	±1,71	25,59	±2,62	25,30	±1,54	24,11	±2,61
	33-43								
	INF-	31,38	±2,84	32,85	±4,25	32,60	±2,49	31,19	±3,63
	34-44								
T2	INF-	36,30	±3,53	39,31	±5,10	37,91	±2,93	36,27	±3,29
	35-45								
	INF-	42,17	±3,78	44,03	±5,81	43,71	±3,65	40,79	±4,79
	36-46								
T2	SUP-	34,98	±1,99	35,92	±2,58	36,14	±1,88	35,97	±2,53
	13-23								
	SUP	42,20	±2,04	43,89	±3,52	43,78	±2,04	42,94	±3,21
	14-24								
T2	SUP-	46,77	±2,67	49,04	±5,22	48,24	±3,23	47,22	±3,36
	15-25								
	SUP-	51,47	±3,03	54,15	±5,57	53,71	±2,97	50,81	±4,09
	16-26								
T2	INF-	26,26	±1,90	27,44	±1,95	27,83	±2,75	26,71	±2,73
	33-43								
	INF-	34,08	±2,26	35,95	±2,89	35,74	±1,83	34,89	±2,83
	34-44								
T2	INF-	39,46	±2,85	42,32	±4,02	41,19	±2,14	40,27	±3,21
	35-45								
	INF-	44,70	±2,40	46,94	±4,56	46,07	±2,49	44,08	±3,40
	36-46								
T3	SUP-	33,28	±2,13	34,85	±2,49	35,00	±2,16	34,43	±2,41
	13-23								

SUP- 14-24	40,54	±2,48	42,55	±3,59	42,52	±2,67	41,47	±3,46
SUP- 15-25	45,31	±2,83	48,03	±4,37	47,15	±3,49	45,83	±3,16
SUP- 16-26	50,22	±3,25	52,84	±5,26	52,53	±3,89	49,49	±4,05
INF- 33-43	25,18	±1,89	26,78	±1,77	26,75	±1,41	25,53	±2,43
INF- 34-44	32,98	±2,09	34,90	±3,04	34,73	±2,17	33,60	±3,05
INF- 35-45	38,37	±2,84	40,91	±4,34	40,18	±2,90	38,91	±3,05
INF- 36-46	43,77	±3,35	45,82	±4,73	45,01	±3,12	42,71	±3,66

Tabla 6. Comparación general entre marcas en los tres tiempos T1, T2 y T3 en N=100

5.3.1. Tendencias de las medias de expansión por marca y tiempo.

Observamos las medidas de expansión dentoalveolar en cada uno de los 8 segmentos transversales SUP e INF en los tres tiempos T1, T2 y T3.

- Invisalign® muestra en promedio una sobreestimación entre 0,93 y 1,70 y lo conseguido. Las mayores discrepancias se producen en el sector anterior superior (SUP 13-23) donde se planifica una expansión de 2,8 mm, pero solo se logra 1,10 mm real. Esta tendencia indica una eficiencia de ejecución menor en segmentos anteriores, posiblemente por menor superficie de contacto entre alineador y diente, así como mayor resistencia ósea.

Conclusión parcial: Invisalign® sobreestima sistemáticamente la expansión, especialmente en caninos y premolares, siendo algo más eficaz en molares inferiores.

- Spark® presenta las menores diferencias absolutas entre T2 y T3 con una media general en torno a 1 mm de discrepancia. Especialmente en el segmento INF 33-43 Spark® logra una diferencia de solo 0,66mm, lo que sugiere un mejor control de torque y fuerza en sectores de difícil acceso.
Spark® demuestra ser el sistema con mayor consistencia predictiva posiblemente asociado a su material y staging algorítmico más progresivo.
- Angel Aligner® muestra una discrepancia constante de entre 1mm y 1,2 mm en todos los segmentos. Este patrón sugiere un modelo de predicción lineal, con escasa adaptación a las particularidades biomecánicas de cada zona del arco.
Angel Aligner® mantiene una predictibilidad intermedia, uniforme.
- HeySmile® presenta las diferencias más elevadas entre lo planificado y los obtenidos llegando hasta 1,54 mm en SUP 13-23. Este resultado puede deberse a:
 - Una menor rigidez del material plástico.
 - Una planificación demasiado optimista por parte del software.
 - Una mecánica de staging más agresiva y menos controlada.HeySmile® sobreestima sistemáticamente la expansión, especialmente en los sectores anteriores y posteriores superiores.

5.3.2. Comportamiento general por segmento transversal.

Los sectores anteriores SUP 13-23 e INF 33-43 son los que presentan mayor discrepancia en todas las marcas, probablemente por la menor superficie de retención del alineador y la alta resistencia del hueso cortical vestibular en esta zona.

En los sectores posteriores SUP 16-26 e INF 36-46 las diferencias son menores, con discrepancias promedio en torno a 1 mm y 1,3 mm. Esto puede deberse a una

mejor retención del alineador en estos sectores y a una distribución más amplia de fuerzas.

En cuanto al arco inferior respecto al superior la expansión predicha es más moderada en el arco inferior y también son las diferencias entre T2 y T3. En cambio, el arco superior tiende a una mayor sobre estimación de la expansión planificada.

5.3.3. Justificación para análisis posteriores.

Este patrón general justifica firmemente la aplicación de análisis inferenciales.

- Wilcoxon o t de Student para muestras apareadas, comparando T2 vs T3 por marca y por segmento
- Cálculo de precisión clínica, expresado como porcentaje. (Clinical Accuracy = $T3/T2 \times 100$).
- Análisis multivariado, para controlar variables como edad, sexo y tipo de arcada.

Estos análisis permitirán determinar no solo si hay diferencias estadísticamente significativas, sino que también qué marcas y en qué segmentos muestran mayor predictibilidad real.

		MARCA															
		INVISALIGN				SPARK				ANGEL ALIGNER				HEYSMILE			
TIEMPO		HOMBRE		MUJER		HOMBRE		MUJER		HOMBRE		MUJER		HOMBRE		MUJER	
T1	SUP- 13- 23	32,97	±2,08	31,87	±2,10	33,53	±2,94	33,75	±3,31	34,00	±2,25	33,07	±2,35	32,66	±2,94	32,52	±2,20
	SUP- 14- 24	39,20	±3,43	37,62	±2,78	41,22	±4,12	40,59	±4,33	40,78	±2,75	40,16	±2,99	39,12	±3,27	39,31	±3,33
	SUP- 15- 25	44,63	±4,00	42,22	±3,20	45,93	±4,86	46,31	±4,66	45,11	±3,39	45,96	±3,84	42,90	±4,48	43,54	±3,77
	SUP- 16- 26	49,96	±4,83	48,10	±2,93	50,88	±5,42	51,57	±5,91	51,00	±3,48	51,44	±4,33	47,83	±4,81	47,90	±4,29
	INF- 33- 43	24,61	±1,82	23,86	±1,68	25,99	±1,89	25,28	±3,11	25,35	±1,57	25,25	±1,58	24,29	±3,17	23,97	±2,18
	INF- 34- 44	33,27	±1,54	30,64	±2,92	33,69	±2,78	32,19	±5,13	32,97	±1,52	32,31	±3,08	30,77	±3,72	31,53	±3,66
	INF- 35- 45	38,84	±3,81	35,31	±2,97	39,54	±4,22	39,13	±5,85	37,55	±2,16	38,19	±3,47	36,06	±3,85	36,43	±2,91

	INF-36-46	45,44	±3,18	40,89	±3,24	43,67	±5,22	44,31	±6,42	43,70	±2,88	43,71	±4,27	39,74	±6,09	41,61	±3,48
T2	SUP-13-23	35,51	±1,39	34,78	±2,18	36,10	±2,64	35,77	±2,62	36,95	±1,58	35,51	±1,91	36,41	±2,47	35,62	±2,62
	SUP-14-24	43,16	±2,03	41,83	±1,97	44,41	±3,22	43,48	±3,81	43,85	±1,80	43,72	±2,27	43,02	±2,93	42,88	±3,51
	SUP-15-25	48,37	±2,60	46,14	±2,49	49,83	±4,65	48,42	±5,73	47,71	±2,84	48,66	±3,55	47,09	±3,58	47,32	±3,31
	SUP-16-26	52,96	±3,80	50,89	±2,57	54,32	±5,84	54,02	±5,56	53,21	±2,64	54,11	±3,25	50,50	±4,90	51,04	±3,51
	INF-33-43	26,44	±1,47	26,18	±2,07	27,62	±2,39	27,31	±1,62	28,65	±3,45	27,18	±1,94	26,79	±3,06	26,64	±2,57
	INF-34-44	35,06	±2,05	33,69	±2,28	36,35	±2,71	35,64	±3,09	36,03	±1,13	35,51	±2,25	34,64	±2,83	35,09	±2,92
	INF-35-45	40,59	±4,27	39,02	±2,08	42,39	±4,10	42,26	±4,11	40,93	±1,72	41,39	±2,47	40,14	±3,27	40,37	±3,29
	INF-36-46	46,44	±2,38	44,02	±2,10	46,66	±4,54	47,15	±4,74	46,28	±1,60	45,91	±3,07	43,39	±3,39	44,62	±3,43
T3	SUP-13-23	34,14	±2,09	32,94	±2,11	34,97	±2,58	34,76	±2,50	35,45	±2,02	34,66	±2,28	34,71	±2,43	34,21	±2,47
	SUP-14-24	41,76	±2,10	40,07	±2,50	43,04	±3,19	42,16	±3,95	42,52	±2,39	42,53	±2,96	41,53	±3,45	41,42	±3,60
	SUP-15-25	46,76	±2,74	44,75	±2,72	48,15	±4,19	47,93	±4,66	46,72	±3,29	47,49	±3,72	45,79	±3,15	45,86	±3,29

SUP- 16- 26	51,00	±4,03	49,92	±2,97	52,66	±5,10	52,99	±5,57	52,52	±3,41	52,54	±4,36	49,48	±4,54	49,49	±3,79
INF- 33- 43	25,46	±1,74	25,07	±1,98	26,99	±1,66	26,61	±1,90	26,62	±1,55	26,86	±1,34	25,78	±2,91	25,34	±2,07
INF- 34- 44	33,90	±1,93	32,63	±2,09	35,40	±2,50	34,51	±3,45	34,98	±1,42	34,53	±2,65	33,00	±3,20	34,08	±2,97
INF- 35- 45	39,57	±3,64	37,91	±2,43	41,05	±3,95	40,79	±4,78	40,23	±2,31	40,14	±3,38	38,83	±2,89	38,96	±3,28
INF- 36- 46	45,83	±2,45	42,97	±3,36	45,61	±4,38	45,98	±5,15	45,01	±2,56	45,01	±3,59	42,04	±3,87	43,24	±3,54

Tabla 7. Comparación general entre marcas en los tres tiempos y por género.

5.4.1. Análisis detallado por segmentos, marca y género en T1, T2 y T3.

La tabla muestra los valores medios y desviaciones estándar de las medidas transversales en mm para los 8 segmentos evaluados en los 3 tiempos, T1, T2 y T3.

Cada combinación se segmenta por marca y por sexo.

5.4.2. Estructura del análisis.

Para cada segmento y cada marca:

- Se comparan los valores de T1, T2 y T3 por sexo.
- Se calcula la diferencia entre T2 y T3. (para detectar posibles sobrecorrecciones)
- Se identifican tendencias entre géneros y se determina si el sexo parece influir de manera sistemática.

- Se proponen posibles pruebas estadísticas posteriores (U de Mann-Whitney, t de Student por sexo o ANOVA para interacción).

5.4.2.1. *Invisalign®*.

5.4.2.1.1. Análisis completo (N=25)

- SUP 13-23.
 - T2 – T3 en hombres: 35,51mm – 34,14 mm = 1,37 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 34,78 mm -32,94 mm= 1,84 mm.
 - Las mujeres presentan una mayor sobrecorrección, lo que sugiere una precisión clínica del software en este segmento anterior para ellas.
- SUP 14-24.
 - T2 – T3 en hombres: 43,16 mm – 41,76 mm = 1,40 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 41,83 mm -40,07 mm = 1,76 mm.
 - Se repite el patrón: mayor discrepancia en mujeres, lo que puede indicar menor respuesta clínica o mayor rigidez del aparato en arcadas femeninas.
- SUP 15-25.
 - T2 – T3 en hombres: 48,37 mm – 46,76 mm = 1,61 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 46,14 mm -44,75 mm = 1,39 mm.
 - Inversión del patrón: los hombres muestran mayor sobrecorrección aquí. Puede reflejar diferencias en masa ósea, longitud de arcada o incluso diseño de staging.
- SUP 16-26.
 - T2 -T3 en hombres: 52,96 mm – 51,00 mm = 1,96 mm.
 - T2 -T3 en mujeres: 50,89 mm – 49,92 mm = 0,97 mm.
 - Claramente los hombres presentan una mayor sobrecorrección de la expansión planificada no lograda en el segmento más posterior superior, consistente con la mayor resistencia ósea en varones.

- INF 33-43.
 - T2 -T3 en hombres: $26,44 \text{ mm} - 25,46 \text{ mm} = 0,98 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $26,18 \text{ mm} - 25,07 \text{ mm} = 1,11 \text{ mm}$.
 - Ligeramente más sobre corregido en mujeres.
- INF 34-44.
 - T2 -T3 en hombres: $35,06 \text{ mm} - 33,90 \text{ mm} = 1,16 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $33,69 \text{ mm} - 32,63 \text{ mm} = 1,06 \text{ mm}$.
 - Ligeramente más sobre corregido en hombres.
- INF 35-45.
 - T2 -T3 en hombres: $40,59 \text{ mm} - 39,57 \text{ mm} = 1,02 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $39,02 \text{ mm} - 37,91 \text{ mm} = 1,11 \text{ mm}$.
 - Ligeramente sobre corregido en mujeres.
- INF 36-46.
 - T2 -T3 en hombres: $46,44 \text{ mm} - 45,83 \text{ mm} = 0,61 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $44,02 \text{ mm} - 42,97 \text{ mm} = 1,05 \text{ mm}$.
 - Aquí existe una notable diferencia donde las mujeres muestran el doble de sobre corregido en el sector posterior inferior.

Sobreestimación del software (T2 - T3) en INVISALIGN® por segmento y género (N=25)

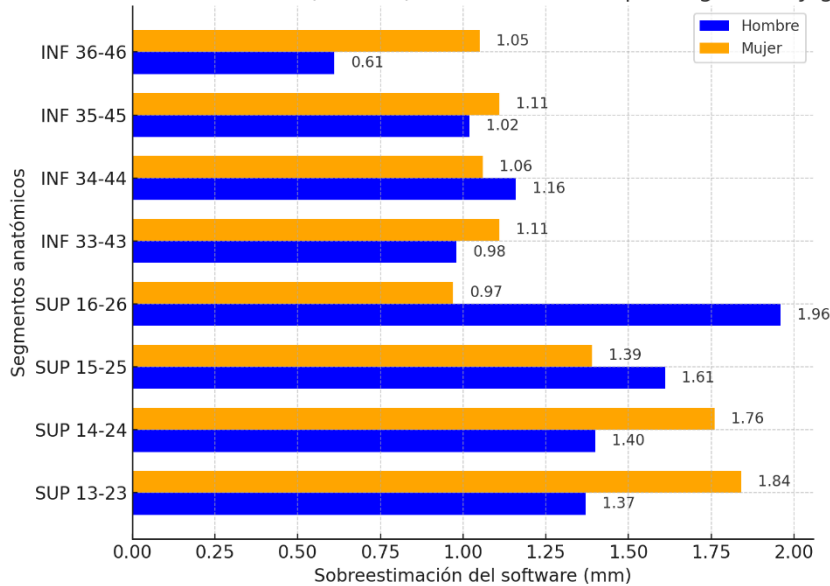


Figura 3. T3 - T2 Invisalign® por segmento y género N=25

5.4.2.2. *Spark®*.

5.4.2.2.1. Análisis completo (N=25)

Análisis completo (N=25)

- SUP 13-23.
 - T2 - T3 en hombres: 36,10 mm - 34,97 mm = 1,13 mm.
 - T2 - T3 en mujeres: 35,77 mm - 34,76 mm = 1,01 mm.
 - Se muestra una sobrecorrección moderada y muy similar entre géneros en el arco anterior superior. La diferencia entre lo predicho y lo logrado es ligeramente mayor en hombres, pero ambos grupos presentan una buena concordancia relativa. Esto sugiere un modelo de staging equilibrado en caninos superiores.

- SUP 14-24.
 - T2 – T3 en hombres: 44,41 mm – 43,04 mm = 1,37 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 43,48 mm – 42,16 mm = 1,32 mm.
 - Sobrecorrección muy similar entre géneros. Ambos géneros presentan una pérdida de alrededor del 3% del movimiento planificado.
- SUP 15-25.
 - T2 – T3 en hombres: 49,83 mm – 48,15 mm = 1,68 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 48,42 mm – 47,93 mm = 0,49 mm.
 - Aquí aparece una diferencia crítica. Spark® logra una predicción mucho más precisa en mujeres en este segmento probablemente menor masa ósea o mejor expresión del staging.
- SUP 16-26.
 - T2 – T3 en hombres: 54,32 mm – 52,66 mm = 1,66 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 54,02 mm – 52,99 mm = 1,03 mm.
 - Aparece un nuevo patrón. Mayor sobrecorrección en hombres. Esto refuerza la hipótesis de que el software no ajusta adecuadamente el staging en pacientes con mayor dimensión esquelética.
- INF 33-43.
 - T2 -T3 en hombres: 27,62 mm – 26,99 mm = 0,63 mm.
 - T2 -T3 en mujeres: 27,31 mm – 26,61 mm = 0,70 mm.
 - Excelente precisión en ambos géneros, con menos de 0,7 mm de sobreestimación. Es el mejor desempeño de Spark® especialmente en hombres. Esto puede deberse a un diseño de ataches eficaz en el segmento anterior inferior.

- INF 34-44.
 - T2 -T3 en hombres: $36,35 \text{ mm} - 35,40 \text{ mm} = 0,95 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $35,64 \text{ mm} - 34,51 \text{ mm} = 1,13 \text{ mm}$.
 - Aunque los hombres tienen una predicción más alta, logran un resultado más fiel. Las mujeres, a pesar de una predicción más conservadora, tienen mayor sobrecorrección.
- INF 35-45.
 - T2 -T3 en hombres: $42,39 \text{ mm} - 41,05 \text{ mm} = 1,34 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $42,26 \text{ mm} - 40,79 \text{ mm} = 1,47 \text{ mm}$.
 - Sobrecorrección alta en ambos géneros, con una ligera ventaja para los hombres. Es uno de los segmentos con menor precisión en Spark®, especialmente en mujeres.
- INF 36-46.
 - T2 -T3 en hombres: $46,66 \text{ mm} - 45,61 \text{ mm} = 1,05 \text{ mm}$.
 - T2 -T3 en mujeres: $47,15 \text{ mm} - 45,98 \text{ mm} = 1,17 \text{ mm}$.
 - Diferencia moderada. Las mujeres tienen mayor sobrecorrección y aunque Spark® predice más expansión en ellas, no lo logra alcanzarla. Esto sugiere que el staging podría ser demasiado ambicioso para arcadas más pequeñas.

Sobreestimación del software (T2 - T3) en SPARK® por segmento y género (N=25)

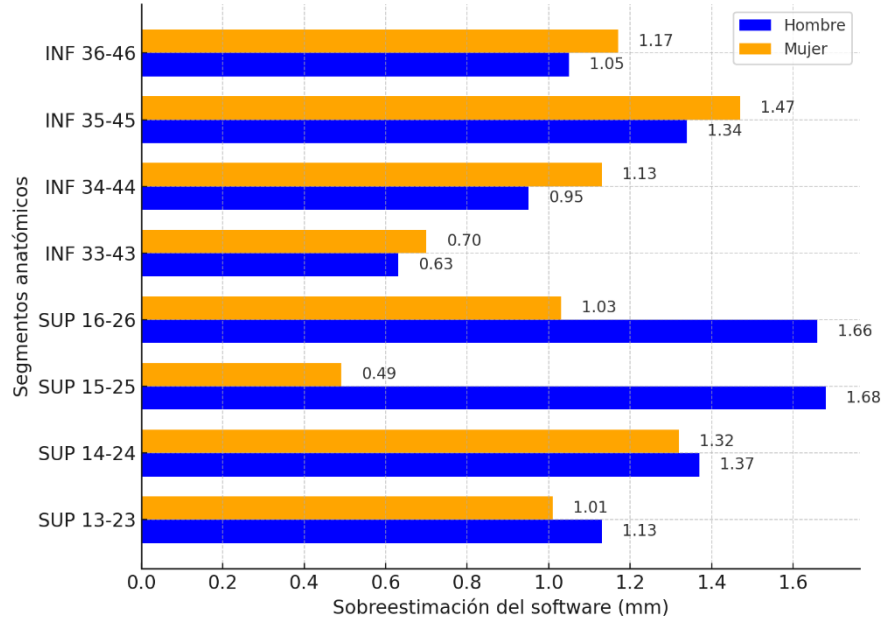


Figura 4 T3 - T2 Angel Aligner® por segmento y género N=25

5.4.2.3. Angel Aligner®

5.4.2.3.1. Análisis completo (N=25)

- SUP 13-23.
 - T2 - T3 en hombres: 36,95 mm – 35,45 mm = 1,50 mm.
 - T2 - T3 en mujeres: 35,51 mm – 34,76 mm= 0,85 mm.
 - En el arco anterosuperior el software de Angel Aligner® sobrecorriges más en hombres a pesar de que ambos géneros tienen anchos iniciales similares (T1 34.00 mm vs 33,07 mm).

- SUP 14-24.

- T2 – T3 en hombres: 43,85 mm – 42,52 mm = 1,33 mm.
- T2 – T3 en mujeres: 43,72 mm – 42,53 mm = 1,19 mm.

Ambos géneros muestran una sobrecorrección moderada, con una ligera ventaja para las mujeres. El sistema no logra completar el movimiento en ninguno de los dos casos. La diferencia entre géneros es pequeña, lo que sugiere un modelo de predicción relativamente consistente en este segmento.

- SUP 15-25.

- T2 – T3 en hombres: 47,71 mm – 46,72 mm = 0,99 mm.
- T2 – T3 en mujeres: 48,66 mm – 47,49 mm = 1,17 mm.
- Aquí se invierte el patrón. Los hombres obtienen mejor precisión que las mujeres a pesar de que el software predice más expansión en ellas. Esto se puede deber a que hay una menor expresión del movimiento en tejidos más densos.

- SUP 16-26.

- T2 – T3 en hombres: 53,21 mm – 52,52 mm = 0,69 mm.
- T2 – T3 en mujeres: 54,11 mm – 52,54 mm = 1,57 mm.
- Este es uno de los hallazgos más relevantes: los hombres tienen una excelente precisión mientras que las mujeres presentan la mayor sobrecorrección de la marca. Aunque las mujeres partes de un ancho inicial similar el software sobreestima fuertemente en ellas. Podría deberse a un staging no ajustado al tamaño esquelético o bien a mayor “binding” en curvaturas más cerradas.

- INF 33-43.

- T2 – T3 en hombres: 28,65 mm – 26,62 mm = 2,03 mm.
- T2 – T3 en mujeres: 27,18 mm – 26,86 mm = 0,32 mm.
- Diferencia extrema entre géneros. Angel Aligner funciona muy bien en mujeres en el sector anterior inferior, pero falla significativamente en hombres. Causas posibles: diseño de ataches, adaptador del alineador, expresión del torque.

- INF 34-44.
 - T2 – T3 en hombres: $36,03 \text{ mm} - 34,98 \text{ mm} = 1,05 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $35,51 \text{ mm} - 34,53 \text{ mm} = 0,98 \text{ mm}$.
 - Este es uno de los hallazgos más relevantes: los hombres tienen una excelente precisión mientras que las mujeres presentan la mayor sobrecorrección de la marca. Aunque las mujeres parten de un ancho inicial similar el software sobreestima fuertemente en ellas. Podría deberse a un staging no ajustado al tamaño esquelético o bien a mayor “binding” en curvaturas más cerradas.
- INF 35-45.
 - T2 – T3 en hombres: $40,93 \text{ mm} - 40,23 \text{ mm} = 0,70 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $41,39 \text{ mm} - 40,14 \text{ mm} = 1,25 \text{ mm}$.
 - Nuevamente los hombres obtienen mejor precisión que las mujeres a pesar de tener una predicción más alta en ellas. Esto refuerza la hipótesis de que Angel Aligner tiende a sobre corregir más en mujeres en segmentos posteriores inferiores
- INF 36-46.
 - T2 – T3 en hombres: $46,28 \text{ mm} - 45,01 \text{ mm} = 1,27 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $45,91 \text{ mm} - 45,01 \text{ mm} = 0,90 \text{ mm}$.
 - Las mujeres logran mejor precisión que los hombres aun cuando el software predice más expansión en ellas. Las mujeres consiguen un resultado más fiel. Esto sugiere que el sistema ajusta mejor el staging en arcadas inferiores femeninas

Sobreestimación del software (T2 - T3) en Angel Aligner® por segmento y género (N=25)

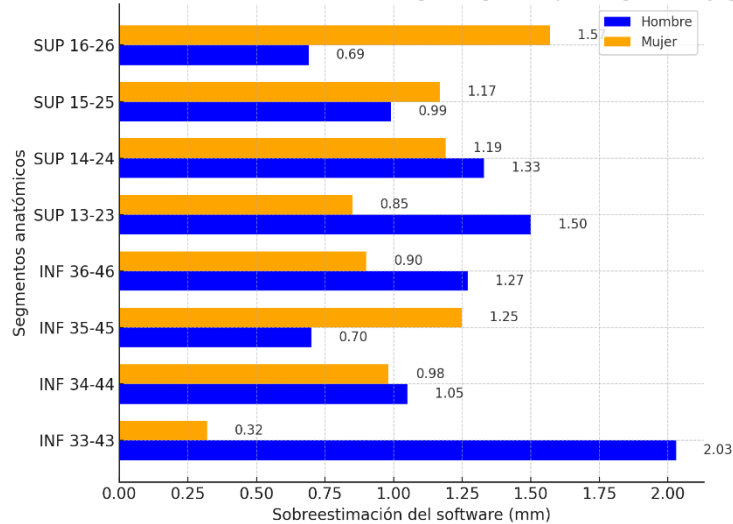


Figura 5. T3 - T2 Angel Aligner® por segmento y género N=25

5.4.2.4. HeySmile®

5.4.2.4.1. Análisis completo (N=25)

- SUP 13-23.
 - T2 - T3 en hombres: 36,41 mm - 34,71 mm = 1,70 mm.
 - T2 - T3 en mujeres: 35,62 mm - 34,21 mm = 1,41 mm.
 - Sobrecorrección moderada en el arco anterosuperior con una ligera ventaja para las mujeres. Aunque el software predice más la expansión en hombres, no logran alcanzarla completamente.
- SUP 14-24.
 - T2 - T3 en hombres: 43,02 mm - 41,53 mm = 1,49 mm.
 - T2 - T3 en mujeres: 42,88 mm - 41,42 mm = 1,46 mm.

- Excelente consistencia entre géneros con sobrecorrección muy similar. HeySmile® mantiene un modelo de predicción equilibrado en este segmento, sin diferencias clínicas significativas por género.
- SUP 15-25.
 - T2 – T3 en hombres: $47,09 \text{ mm} - 45,79 \text{ mm} = 1,30 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $47,32 \text{ mm} - 45,86 \text{ mm} = 1,46 \text{ mm}$.
 - Las mujeres presentan una sobrecorrección ligeramente mayor a pesar de una predicción similar.
- SUP 16-26.
 - T2 – T3 en hombres: $50,50 \text{ mm} - 49,48 \text{ mm} = 1,02 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $51,04 \text{ mm} - 49,49 \text{ mm} = 1,55 \text{ mm}$.
 - Las mujeres tienen mayor sobrecorrección a pesar de una predicción más alta, esto es inesperado ya su anchura transversal inicial es menor.
- INF 33-43.
 - T2 – T3 en hombres: $26,79 \text{ mm} - 25,78 \text{ mm} = 1,01 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $26,64 \text{ mm} - 25,34 \text{ mm} = 1,30 \text{ mm}$.
 - El software tiende a sobre corregir más en mujeres en este segmento.
- INF 34-44.
 - T2 – T3 en hombres: $34,64 \text{ mm} - 33,00 \text{ mm} = 1,64 \text{ mm}$.
 - T2 – T3 en mujeres: $35,09 \text{ mm} - 34,08 \text{ mm} = 1,01 \text{ mm}$.
 - Aquí se invierte el patrón, los hombres tienen mayor sobrecorrección mientras que las mujeres logran un resultado más fiel.

- INF 35-45.
 - T2 – T3 en hombres: 40,14 mm – 38,83 mm = 1,31 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 40,37 mm – 38,96 mm = 1,41 mm.
 - Sobrecorrección moderada en ambos géneros con una ligera ventaja para las mujeres. HeySmile® mantiene un buen equilibrio, aunque con tendencia a sobreestimar más en mujeres.
- INF 36-46.
 - T2 – T3 en hombres: 43,39 mm – 42,04 mm = 1,35 mm.
 - T2 – T3 en mujeres: 44,62 mm – 43,24 mm = 1,38 mm.
 - Sobrecorrección muy similar entre géneros, la más equilibrada en este segmento. HeySmile® muestra una predicción consistente.

Sobreestimación del software (T2 - T3) en HEY SMILE® por segmento y género (N=25)

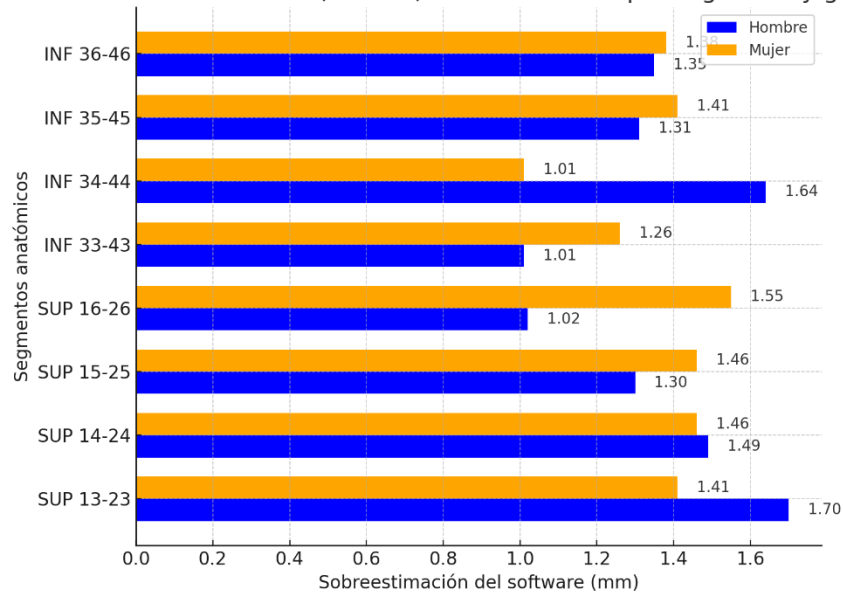


Figura 6. T3 - T2 HeySmile® por segmento y género N=25

5.4.2.5. Panel de barras verticales por marca y género.

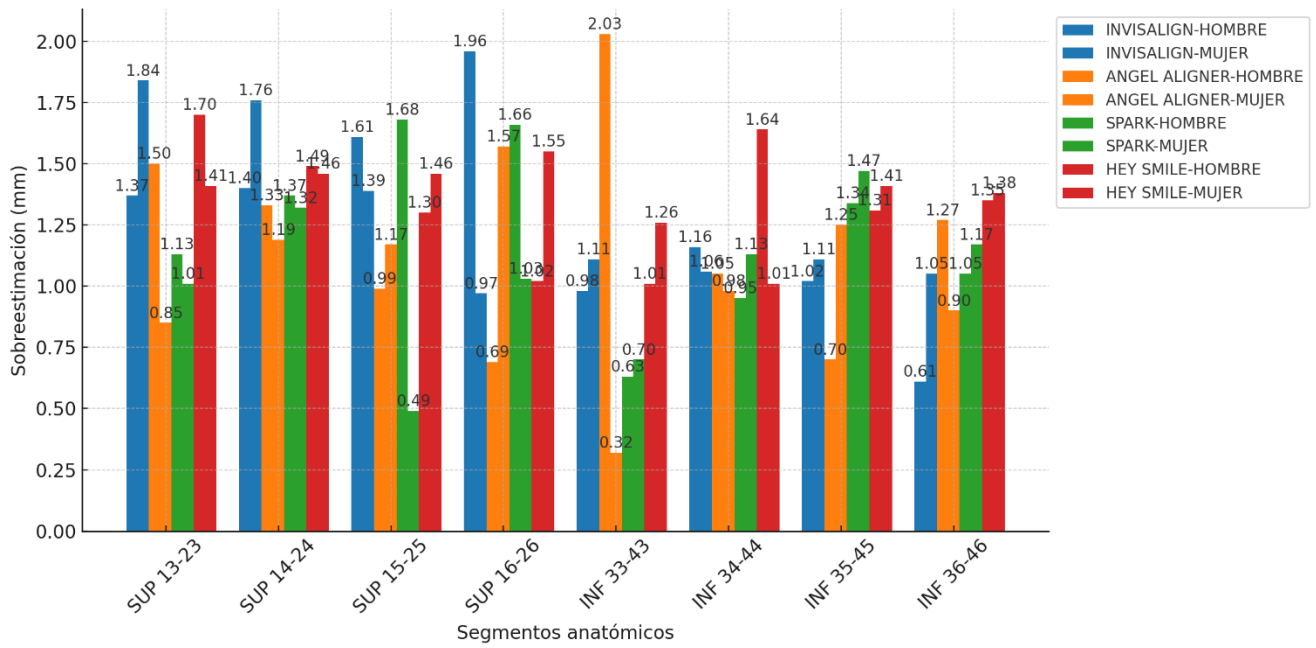


Figura 7. Panel vertical combinado por marca y género.

5.5. PRUEBA DE INDEPENDENCIA RESPECTO A LA MARCA N=100.

		MARCA								ANOVA	
		INVISALIGN(A)		SPARK(B)		ANGEL ALIGNER(C)		HEY SMILE(D)		p-valor	Bonferroni
T1	SUP-13-23	32,18	±2,11	33,65	±3,09	33,48	±2,31	32,58	±2,50	0,126	
	SUP-14-24	38,06	±2,99	40,86	±4,16	40,44	±2,84	39,23	±3,24	0,017*	A vs B
	SUP-15-25	42,90	±3,53	46,14	±4,65	45,59	±3,60	43,26	±4,02	0,008**	A vs B
	SUP-16-26	48,62	±3,56	51,27	±5,60	51,24	±3,90	47,87	±4,43	0,011*	B vs D
	INF-33-43	24,07	±1,71	25,59	±2,62	25,30	±1,54	24,11	±2,61	0,023*	A vs B
	INF-34-44	31,38	±2,84	32,85	±4,25	32,60	±2,49	31,19	±3,63	0,205	
	INF-35-45	36,30	±3,53	39,31	±5,10	37,91	±2,93	36,27	±3,29	0,054	
	INF-36-46	42,17	±3,78	44,03	±5,81	43,71	±3,65	40,79	±4,79	0,153	
T2	SUP-13-23	34,98	±1,99	35,92	±2,58	36,14	±1,88	35,97	±2,53	0,271	
	SUP-14-24	42,20	±2,04	43,89	±3,52	43,78	±2,04	42,94	±3,21	0,115	
	SUP-15-25	46,77	±2,67	49,04	±5,22	48,24	±3,23	47,22	±3,36	0,141	
	SUP-16-26	51,47	±3,03	54,15	±5,57	53,71	±2,97	50,81	±4,09	0,009**	B vs D
	INF-33-43	26,26	±1,90	27,44	±1,95	27,83	±2,75	26,71	±2,73	0,070	
	INF-34-44	34,08	±2,26	35,95	±2,89	35,74	±1,83	34,89	±2,83	0,033*	A vs B
	INF-35-45	39,46	±2,85	42,32	±4,02	41,19	±2,14	40,27	±3,21	0,031*	A vs B
	INF-36-46	44,70	±2,40	46,94	±4,56	46,07	±2,49	44,08	±3,40	0,033*	B vs D
T3	SUP-13-23	33,28	±2,13	34,85	±2,49	35,00	±2,16	34,43	±2,41	0,079	
	SUP-14-24	40,54	±2,48	42,55	±3,59	42,52	±2,67	41,47	±3,46	0,053	
	SUP-15-25	45,31	±2,83	48,03	±4,37	47,15	±3,49	45,83	±3,16	0,010*	A vs B
	SUP-16-26	50,22	±3,25	52,84	±5,26	52,53	±3,89	49,49	±4,05	0,011*	B vs D
	INF-33-43	25,18	±1,89	26,78	±1,77	26,75	±1,41	25,53	±2,43	0,001**	A vs B – A vs C
	INF-34-44	32,98	±2,09	34,90	±3,04	34,73	±2,17	33,60	±3,05	0,011*	A vs B

INF-35-45	38,37	±2,84	40,91	±4,34	40,18	±2,90	38,91	±3,05	0,045*	A vs B
INF-36-46	43,77	±3,35	45,82	±4,73	45,01	±3,12	42,71	±3,66	0,062	

Tabla 8. Figura 8. Prueba de independencia respecto a la marca

5.5.1. Análisis detallado de la prueba de independencia.

Haremos hincapié en los segmentos intermedios ya que son los puntos de inflexión biomecánica entre los caninos y los premolares. Por su posición central y su morfología son los dientes que más influyen en la forma del arco dental durante la expansión.

1. Biomecánicamente son los dientes que más fuerza transmiten durante la expansión.
2. Clínicamente, su movimiento determina si el arco se ensancha en forma de “U” o de “V”.
3. Digitalmente el software suele planificar mayor expansión en estos segmentos para compensar la resistencia de los molares.

5.5.1.1. Diferencia T2 – T1 (Predicción vs Situación Inicial).

Esta fase compara la expansión planificada por el software (T2) con la situación inicial (T1), lo que refleja la ambición del algoritmo de planificación de cada marca.

- Segmentos anteriores (SUP 13-23, INF 33-43).
 - Las marcas planifican una expansión similar en estos segmentos.
 - Los valores son moderados (alrededor de 2-3 mm).
 - No hay diferencias significativas entre marcas ($p > 0.05$).
- Segmento intermedio (SUP 14-24).
 - Invisalign® planifica la mayor expansión (4,14 mm) pero también tiene la mayor diferencia de planificación (1,66 mm)

- Angel Aligner® tiene la menor diferencia de planificación (1,25 mm) lo que indica mayor predicción.
 - Hay diferencias altamente significativas en T3 – T1 y T3 – T2 ($p < 0.001$)
 - Esto confirma que la marca influye en el resultado final incluso cuando la planificación es similar.
- Segmento intermedio (SUP 15-25).
 - HeySmile® planifica la mayor expansión (3,96 mm) pero también tiene la mayor diferencia de planificación.
 - Spark® tiene la menor diferencia de planificación (1. 01 mm) lo que indica alta predicción.
 - Hay diferencias altamente significativas en T3 – T1 y T3 – T2 ($p < 0.001$)
 - Spark® es el más preciso en este segmento a pesar de planificar menos.
- Segmento intermedio (INF 34-44).
 - HeySmile® planifica la mayor expansión (3,60 mm) pero también tiene la mayor diferencia de planificación (1,29 mm).
 - Angel Aligner® tiene la menor diferencia de planificación (1,01mm) lo que indica alta predicción.
 - Hay diferencias altamente significativas en T3 – T1 y T3 – T2 ($p < 0.001$).
 - Angel Aligner® es el más preciso en este segmento.
- Segmento intermedio (INF 35-45)
 - HeySmile® planifica la mayor expansión (4.00 mm) pero también tiene la mayor diferencia de planificación (1,37 mm).
 - Hay diferencias altamente significativas en T3 – T1 y T3 – T2 ($p < 0.001$).
 - Angel Aligner® es el más preciso en este segmento a pesar de planificar menos.

- Segmentos posteriores (SUP 16-26, INF 36-46).
 - Las marcas planifican mayor expansión en molares superiores e inferiores.
 - Los valores son más altos (alrededor de 2,5 – 4 mm).
 - Aunque no hay diferencias significativas entre las marcas, Spark® y HeySmile® tienden a planificar más la expansión en estos segmentos.
- Conclusión parcial.
 - Las marcas no difieren significativamente en su planificación inicial, pero hay tendencias hacia una mayor ambición en segmentos posteriores, especialmente en Spark® y HeySmile®.

5.5.1.2. *Diferencia T3 – T1 (Resultado final vs Situación Inicial).*

Esta fase compara el resultado clínico final (T3) con la situación inicial (T1), lo que refleja la expansión real lograda durante el tratamiento.

- Segmentos anteriores (SUP 13-23, INF 33-43)
 - Las marcas logran menor expansión en estos segmentos.
 - Los valores son bajos (alrededor de 1 – 2 mm)
 - Hay diferencias significativas entre las marcas en todos estos segmentos ($p < 0.001$).
- Segmentos posteriores (SUP 16-26, INF 36-46).
 - Las marcas logran mayor expansión en molares superiores e inferiores.
 - Los valores son más altos (alrededor del 1,5 – 2,5 mm).
 - También existen diferencias significativas entre marcas en estos segmentos ($p < 0.001$)

5.5.1.3. *Diferencia T3 – T2 (Resultado final vs Predicción)*

Esta fase compara el resultado clínico final (T3) con la predicción del software (T2), lo que refleja la sobreestimación o subestimación del movimiento.

- Segmentos anteriores (SUP 13-23, INF 33-43)
 - Las marcas muestran sobreestimación generalizada en estos segmentos.
 - Los valores son bajos (alrededor de 1 – 1,5 mm).
 - Hay diferencias significativas entre las marcas en todos los segmentos anteriores ($p < 0.001$).
- Segmentos posteriores (SUP 16-26, INF 36-46).
 - Las marcas también muestran sobreestimación en molares superiores e inferiores.
 - Los valores son más altos (alrededor 1,5 – 2-5 mm)
 - También hay diferencias significativas en estos segmentos ($p < 0.001$).

5.5.1.4. *Análisis detallado de Bonferroni.*

- La columna de Bonferroni indica las comparaciones “post hoc” entre marcas cuando el ANOVA muestra diferencias significativas ($p < 0.05$). De aquí podemos deducir:
 - En T1:
 - SUP 15-25 Spark® inicia con mayor anchura transversal.
 - SUP 16-26 Spark® inicia con mayor anchura transversal.

- INF 33-43 Spark® inicia con mayor anchura transversal.
- En T2:
 - INF 33-43 Spark® planifica más expansión que Invisalign®.
 - INF 34-44 Spark® planifica más expansión que Invisalign®.
 - INF 35-45 Spark® planifica más expansión que HeySmile.
 - INF 36-46 Spark® planifica más expansión que HeySmile.
- En T3:
 - INF 33-43 Spark® y Angel Aligner® logran mayor expansión que Invisalign®.
 - INF 34-44 Spark® logra mayor expansión que Invisalign®.
 - INF 35-45 Spark® logra mayor expansión que Invisalign®.
 - SUP 15-25 Spark® logra mayor expansión que Invisalign®.
 - SUP 16-26 Spark® logra mayor expansión que Invisalign®.

5.5.1.4.1. Panel vertical prueba de independencia respecto a la marca N=100

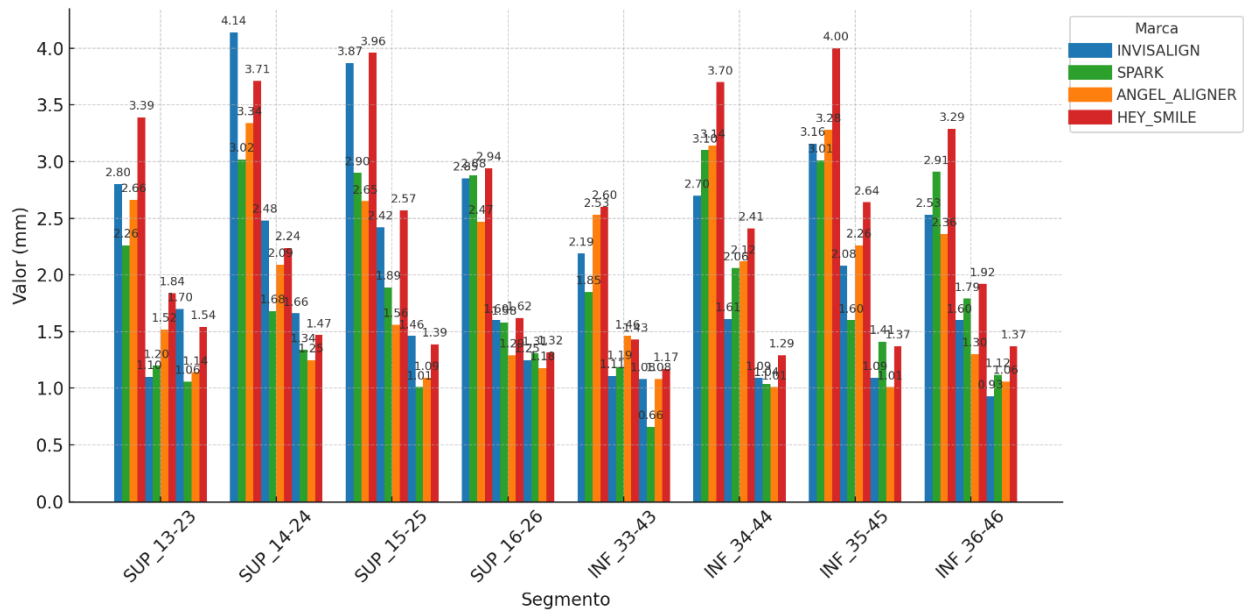


Figura 8. Panel vertical prueba de independencia respecto a la marca N=100

5.5.1.4.2. Panel vertical prueba de independencia Bonferroni N=100

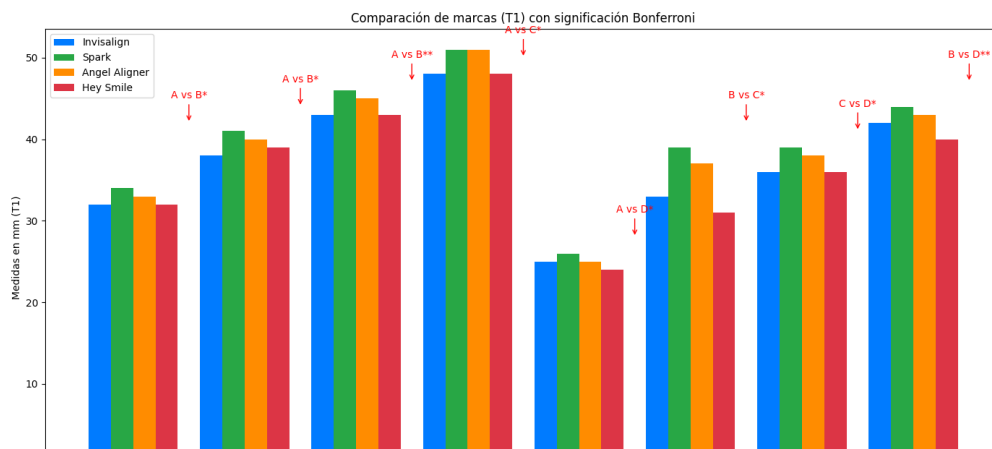


Figura 9. Panel vertical prueba de independencia Bonferroni N=100

5.6. COMPARACIONES MÚLTIPLES.

Esta tabla contiene los resultados de las pruebas post hoc de Bonferroni después del ANOVA aplicadas para identificar entre qué marcas específicas existen diferencias estadísticamente significativas en cada segmento y tiempo.

Está estructurada como:

- Variable dependiente: segmento dental y tiempo de comparación.
- (I): Marca de referencia.
- (J): Marca comparada.
- Diferencia de medias (I-J): Diferencia entre las medias de las dos marcas.
- Sig: p-valor de la comparación.
- Intervalo de confianza al 95%: Límite inferior y superior.

Comparaciones múltiples

Bonferroni

Variable			Diferencia de medias	Desv.	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
dependiente	(I) MARCA	(J) MARCA				Límite inferior	Límite superior
SUP-13-23 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	-,10000	,37140	,042	-,1006	,9006
		ANGEL	-,42360	,37140		-,14242	,5770
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,74160	,37140		-,17422	,2590
	SPARK	INVISALIGN	,10000	,37140		-,9006	1,1006
		ANGEL	-,32360	,37140		-,13242	,6770
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,64160	,37140		-,16422	,3590
	ANGEL	INVISALIGN	,42360	,37140		-,5770	1,4242
		ALIGNER					
	ALIGNER	SPARK	,32360	,37140		-,6770	1,3242
		HEY SMILE	-,31800	,37140		-,13186	,6826
	HEY SMILE	INVISALIGN	,74160	,37140	,042	-,2590	1,7422
		SPARK	,64160	,37140		-,3590	1,6422
		ANGEL	,31800	,37140		-,6826	1,3186
		ALIGNER					
SUP-14-24 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	,79600	,45792	,032	-,4377	2,0297
		ANGEL	,39200	,45792		-,8417	1,6257
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,23800	,45792		-,9957	1,4717
	SPARK	INVISALIGN	-,79600	,45792	,032	-2,0297	,4377
		ANGEL	-,40400	,45792		-1,6377	,8297
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,55800	,45792		-1,7917	,6757
	ANGEL	INVISALIGN	-,39200	,45792		-1,6257	,8417
		ALIGNER					
	ALIGNER	SPARK	,40400	,45792		-,8297	1,6377
		HEY SMILE	-,15400	,45792		-1,3877	1,0797
	HEY SMILE	INVISALIGN	-,23800	,45792		-1,4717	,9957

		SPARK	,55800	,45792		-6757	1,7917
		ANGEL	,15400	,45792		-1,0797	1,3877
		ALIGNER					
SUP-15-25 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	,52800	,42888		-6274	1,6834
		ANGEL	,85200	,42888		-,3034	2,0074
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,15440	,42888		-1,3098	1,0010
	SPARK	INVISALIGN	-,52800	,42888		-1,6834	,6274
		ANGEL	,32400	,42888		-,8314	1,4794
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,68240	,42888		-1,8378	,4730
	ANGEL	INVISALIGN	-,85200	,42888		-2,0074	,3034
		ALIGNER	SPARK	-,32400	,42888	-1,4794	,8314
		HEY SMILE	-1,00640	,42888	,026	-2,1618	,1490
		HEY SMILE	INVISALIGN	,15440	,42888	-1,0010	1,3098
	SPARK	INVISALIGN	,68240	,42888		-,4730	1,8378
		ANGEL	1,00640	,42888	,026	-,1490	2,1618
		ALIGNER					
		HEY SMILE					
SUP-16-26 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	,02400	,40381		-1,0639	1,1119
		ANGEL	,31200	,40381		-,7759	1,3999
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,01760	,40381		-1,1055	1,0703
	SPARK	INVISALIGN	-,02400	,40381		-1,1119	1,0639
		ANGEL	,28800	,40381		-,7999	1,3759
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,04160	,40381		-1,1295	1,0463
	ANGEL	INVISALIGN	-,31200	,40381		-1,3999	,7759
		ALIGNER	SPARK	-,28800	,40381	-1,3759	,7999
		HEY SMILE	-,32960	,40381	,040	-1,4175	,7583
		HEY SMILE	INVISALIGN	,01760	,40381	-1,0703	1,1055
	SPARK	INVISALIGN	,04160	,40381		-1,0463	1,1295
		ANGEL	,32960	,40381	,040	-,7583	1,4175
		ALIGNER					
		HEY SMILE					
INF-13-23 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	-,08000	,37083	1,	-1,0790	,9190
		ALIGNER					

		ANGEL	-,34800	,37083	,030	-1,3470	,6510
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,31960	,37083		-1,3186	,6794
	SPARK	INVISALIGN	,08000	,37083		-,9190	1,0790
		ANGEL	-,26800	,37083		-1,2670	,7310
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,23960	,37083		-1,2386	,7594
		ANGEL	,34800	,37083	,030	-,6510	1,3470
		ALIGNER	,26800	,37083		-,7310	1,2670
		HEY SMILE	,02840	,37083		-,9706	1,0274
		HEY SMILE	,31960	,37083		-,6794	1,3186
		SPARK	,23960	,37083		-,7594	1,2386
INF-14-24 T3-T1		ANGEL	-,02840	,37083		-1,0274	,9706
		ALIGNER					
		INVISALIGN					
	SPARK	INVISALIGN	-,44800	,56386		-1,9671	1,0711
		ANGEL	-,51600	,56386		-2,0351	1,0031
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,80240	,56386	,048	-2,3215	,7167
		SPARK	,44800	,56386		-1,0711	1,9671
		ANGEL	-,06800	,56386		-1,5871	1,4511
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,35440	,56386		-1,8735	1,1647
		ANGEL	,51600	,56386		-1,0031	2,0351
INF-15-25 T3-T1		ALIGNER	,06800	,56386		-1,4511	1,5871
		HEY SMILE	-,28640	,56386		-1,8055	1,2327
		INVISALIGN					
	SPARK	INVISALIGN	,80240	,56386	,048	-,7167	2,3215
		SPARK	,35440	,56386		-1,1647	1,8735
		ANGEL	,28640	,56386		-1,2327	1,8055
		ALIGNER					
		INVISALIGN					
	SPARK	INVISALIGN	,47600	,49742		-,8641	1,8161
		ANGEL	-,18800	,49742		-1,5281	1,1521
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,55960	,49742		-1,8997	,7805

	SPARK	INVISALIGN	-47600	,49742		-1,8161	,8641
		ANGEL	-66400	,49742		-2,0041	,6761
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-1,03560	,49742	,041	-2,3757	,3045
	ANGEL	INVISALIGN	,18800	,49742		-1,1521	1,5281
		ALIGNER	,66400	,49742		-,6761	2,0041
		HEY SMILE	-,37160	,49742		-1,7117	,9685
	HEY SMILE	INVISALIGN	,55960	,49742		-,7805	1,8997
		SPARK	1,03560	,49742	,041	-,3045	2,3757
		ANGEL	,37160	,49742		-,9685	1,7117
		ALIGNER					
INF-16-26 T3-T1	INVISALIGN	SPARK	-1,18800	,52567		-1,6042	1,2282
		ANGEL	,30000	,52567		-1,1162	1,7162
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,32160	,52567		-1,7378	1,0946
	SPARK	INVISALIGN	,18800	,52567		-1,2282	1,6042
		ANGEL	,48800	,52567		-,9282	1,9042
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,13360	,52567		-1,5498	1,2826
	ANGEL	INVISALIGN	-,30000	,52567		-1,7162	1,1162
		ALIGNER	-,48800	,52567		-1,9042	,9282
		HEY SMILE	-,62160	,52567	,039	-2,0378	,7946
	HEY SMILE	INVISALIGN	,32160	,52567		-1,0946	1,7378
		SPARK	,13360	,52567		-1,2826	1,5498
		ANGEL	,62160	,52567	,039	-,7946	2,0378
		ALIGNER					
SUP-13-23 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	-,64000	,34177	,045	-1,5607	,2807
		ANGEL	-,56400	,34177		-1,4847	,3567
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,15960	,34177		-1,0803	,7611
	SPARK	INVISALIGN	,64000	,34177	,045	-,2807	1,5607
		ANGEL	,07600	,34177		-,8447	,9967
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,48040	,34177		-,4403	1,4011
	INVISALIGN		,56400	,34177		-,3567	1,4847

	ANGEL	SPARK	-,07600	,34177		-,9967	,8447
	ALIGNER	HEY SMILE	,40440	,34177		-,5163	1,3251
	HEY SMILE	INVISALIGN	,15960	,34177		-,7611	1,0803
		SPARK	-,48040	,34177		-1,4011	,4403
		ANGEL	-,40440	,34177		-1,3251	,5163
		ALIGNER					
SUP-14-24 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	-,32000	,39553		-1,3856	,7456
		ANGEL	-,40800	,39553	,030	-1,4736	,6576
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,18760	,39553		-1,2532	,8780
	SPARK	INVISALIGN	,32000	,39553		-,7456	1,3856
		ANGEL	-,08800	,39553		-1,1536	,9776
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,13240	,39553		-,9332	1,1980
	ANGEL	INVISALIGN	,40800	,39553	,030	-,6576	1,4736
	ALIGNER	SPARK	,08800	,39553		-,9776	1,1536
		HEY SMILE	,22040	,39553		-,8452	1,2860
	HEY SMILE	INVISALIGN	,18760	,39553		-,8780	1,2532
		SPARK	-,13240	,39553		-1,1980	,9332
		ANGEL	-,22040	,39553		-1,2860	,8452
		ALIGNER					
SUP-15-25 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	-,44400	,48640	,037	-1,7544	,8664
		ANGEL	-,36800	,48640		-1,6784	,9424
		ALIGNER					
		HEY SMILE	-,06680	,48640		-1,3772	1,2436
	SPARK	INVISALIGN	,44400	,48640	,037	-,8664	1,7544
		ANGEL	,07600	,48640		-1,2344	1,3864
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,37720	,48640		-,9332	1,6876
	ANGEL	INVISALIGN	,36800	,48640		-,9424	1,6784
	ALIGNER	SPARK	-,07600	,48640		-1,3864	1,2344
		HEY SMILE	,30120	,48640		-1,0092	1,6116
	HEY SMILE	INVISALIGN	,06680	,48640		-1,2436	1,3772

		SPARK	- ,37720	,48640		-1,6876	,9332
		ANGEL	- ,30120	,48640		-1,6116	1,0092
		ALIGNER					
SUP-16-26 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	,06000	,41840		-1,0672	1,1872
		ANGEL	- ,06800	,41840		-1,1952	1,0592
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,07200	,41840		-1,0552	1,1992
	SPARK	INVISALIGN	- ,06000	,41840		-1,1872	1,0672
		ANGEL	- ,12800	,41840	,031	-1,2552	,9992
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,01200	,41840		-1,1152	1,1392
	ANGEL	INVISALIGN	,06800	,41840		-1,0592	1,1952
		ALIGNER	,12800	,41840	,031	- ,9992	1,2552
		HEY SMILE	,14000	,41840	,024	- ,9872	1,2672
		HEY SMILE	- ,07200	,41840		-1,1992	1,0552
	SPARK	INVISALIGN	- ,01200	,41840		-1,1392	1,1152
		ANGEL	- ,14000	,41840	,024	-1,2672	,9872
		ALIGNER					
		HEY SMILE					
INF-33-43 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	- ,41600	,41597		-1,5366	,7046
		ANGEL	- ,00400	,41597		-1,1246	1,1166
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,09080	,41597		-1,0298	1,2114
	SPARK	INVISALIGN	,41600	,41597		- ,7046	1,5366
		ANGEL	,41200	,41597		- ,7086	1,5326
		ALIGNER					
		HEY SMILE	,50680	,41597	,036	- ,6138	1,6274
	ANGEL	INVISALIGN	,00400	,41597		-1,1166	1,1246
		ALIGNER	- ,41200	,41597		-1,5326	,7086
		HEY SMILE	,09480	,41597		-1,0258	1,2154
		HEY SMILE	- ,09080	,41597		-1,2114	1,0298
	SPARK	INVISALIGN	- ,50680	,41597	,036	-1,6274	,6138
		ANGEL	- ,09480	,41597		-1,2154	1,0258
		ALIGNER					
		HEY SMILE					
INF-34-44 T3-T2	INVISALIGN	SPARK	- ,04800	,31411		- ,8942	,7982

		ANGEL		-,08000	,31411		-,9262	,7662
		ALIGNER						
		HEY SMILE		,19480	,31411		-,6514	1,0410
SPARK	INVISALIGN			,04800	,31411		-,7982	,8942
	ANGEL			-,03200	,31411		-,8782	,8142
	ALIGNER							
	HEY SMILE			,24280	,31411		-,6034	1,0890
ANGEL	INVISALIGN			,08000	,31411		-,7662	,9262
ALIGNER	SPARK			,03200	,31411		-,8142	,8782
	HEY SMILE			,27480	,31411	,030	-,5714	1,1210
HEY SMILE	INVISALIGN			-,19480	,31411		-1,0410	,6514
	SPARK			-,24280	,31411		-1,0890	,6034
	ANGEL			-,27480	,31411	,030	-1,1210	,5714
	ALIGNER							
INF-35-45 T3-T2	INVISALIGN	SPARK		,32000	,39586		-,7465	1,3865
		ANGEL		-,07600	,39586		-1,1425	,9905
		ALIGNER						
		HEY SMILE		,27760	,39586		-,7889	1,3441
SPARK	INVISALIGN			-,32000	,39586		-1,3865	,7465
	ANGEL			-,39600	,39586	,028	-1,4625	,6705
	ALIGNER							
	HEY SMILE			-,04240	,39586		-1,1089	1,0241
ANGEL	INVISALIGN			,07600	,39586		-,9905	1,1425
ALIGNER	SPARK			,39600	,39586	,028	-,6705	1,4625
	HEY SMILE			,35360	,39586		-,7129	1,4201
HEY SMILE	INVISALIGN			-,27760	,39586		-1,3441	,7889
	SPARK			,04240	,39586		-1,0241	1,1089
	ANGEL			-,35360	,39586		-1,4201	,7129
	ALIGNER							
INF-36-46 T3-T2	INVISALIGN	SPARK		,18800	,37856		-,8319	1,2079
		ANGEL		,13200	,37856		-,8879	1,1519
		ALIGNER						
		HEY SMILE		,43600	,37856	,039	-,5839	1,4559

SPARK	INVISALIGN	-,18800	,37856		-1,2079	,8319
	ANGEL	-,05600	,37856		-1,0759	,9639
	ALIGNER					
	HEY SMILE	,24800	,37856		-,7719	1,2679
ANGEL	INVISALIGN	-,13200	,37856		-1,1519	,8879
ALIGNER	SPARK	,05600	,37856		-,9639	1,0759
	HEY SMILE	,30400	,37856		-,7159	1,3239
HEY SMILE	INVISALIGN	-,43600	,37856	,039	-1,4559	,5839
	SPARK	-,24800	,37856		-1,2679	,7719
	ANGEL	-,30400	,37856		-1,3239	,7159
	ALIGNER					

Tabla 9. Comparaciones múltiples

5.6.1. Análisis por segmento y tiempo (T3 – T2).

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Invisalign® vs Spark®	-0.64	0.045*	Significativa: Invisalign® logra menos expansión que Spark®.

Tabla 10. SUP 13-23 T3-T2.

- Spark® es superior a Invisalign® a nivel de caninos superiores con una diferencia de 0.64 mm a su favor (p=0.045)

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Invisalign® vs Angel Aligner®	-0.408	0.030*	Significativa: Invisalign® logra menos expansión que Angel Aligner®.

Tabla 11. SUP 14-24 T3-T2.

- Angel Aligner® es superior a Invisalign® a nivel de los 1º premolares superiores, con una diferencia de 0.408 mm a su favor (p=0.030). Esto indica una mejor predicción y control del staging en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Invisalign® vs Spark®	-0.444	0.037*	Significativa: Invisalign® logra menos expansión que Spark®

Tabla 12. SUP 15-25 T3-T2.

- Spark® es superior a Invisalign® a nivel de los 2º premolares superiores con una diferencia de 0.444 mm a su favor ($p = 0.037$). Esto sugiere que Spark® tiene un algoritmo de staging más eficaz en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Spark® vs Angel Aligner®	-0.128	0.031*	Significativa: Spark® logra menos expansión que Angel Aligner®.
Angel aligner® vs HeySmile®.	0.14	0.024*	Significativa: Angel Aligner® logra más expansión que HeySmile®.

Tabla 13. SUP 16-26 T3-T2.

- Angel Aligner® es la marca más eficaz a nivel de 1º molares superiores superando tanto a Spark® como a HeySmile®. Esto indica un staging digital más eficiente en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Spark® vs HeySmile®.	0.5068	0.036*	Significativa: Spark® logra más expansión que HeySmile®.

Tabla 14. INF 33-43 T3-T2.

- Spark® logra más expansión que Hey Smile® en caninos inferiores con una diferencia de 0.5068 mm a su favor ($p=0.036$). Esto sugiere que Spark® es más eficaz en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Angel Aligner® vs HeySmile®.	0.2748	0.030*	Significativa: Angel Aligner® logra más expansión que HeySmile®.

Tabla 15. INF 34-44 T3-T2.

- Angel Aligner® logra más expansión que HeySmile® a nivel de 1º premolares inferiores con una diferencia de 0.2748 mm a su favor ($p=0.030$). Esto sugiere que Angel Aligner® es más eficaz en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Spark® vs Angel Aligner®	-0.396	0.028*	Significativa: Angel Aligner® logra más expansión que Spark®

Tabla 16. INF 35-45 T3-T2.

- Spark® logra más expansión que Angel Aligner® a nivel de 2º premolares inferiores con una diferencia de 0.396 mm a su favor (p=0.028). Esto sugiere que Spark® es más eficaz en este segmento.

COMPARACIÓN	DIF.DE MEDIAS (I-J)	SIG.	INTERPRETACIÓN
Invisalign® vs HeySmile®.	0.4360	0.039*	Significativa: Angel Aligner® logra más expansión que HeySmile®.

Tabla 17. INF 36-46 T3-T2.

- Invisalign® logra más expansión que HeySmile® a nivel de 1º molares inferiores con una diferencia de 0.436 mm a su favor (p=0.039). Esto sugiere que Invisalign® es más eficaz en este segmento.

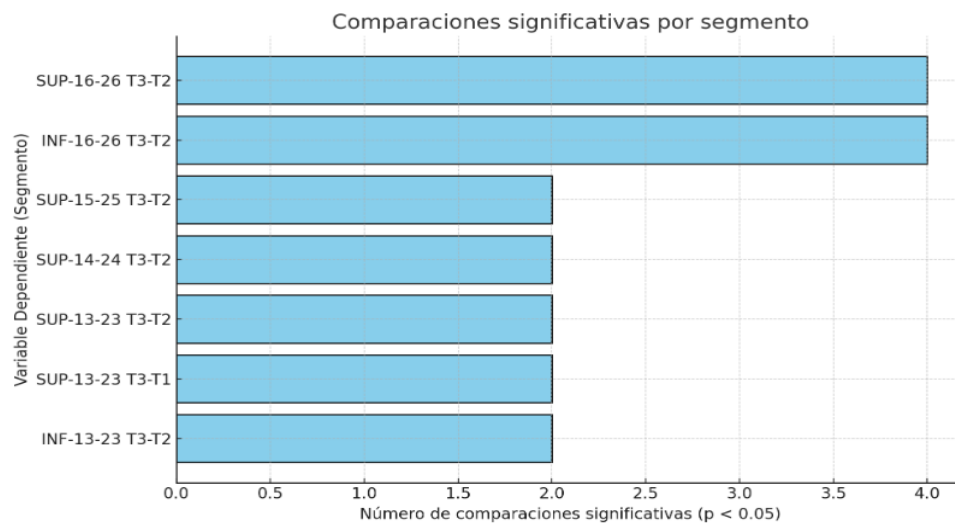


Figura 11. Comparaciones significativas por segmento.

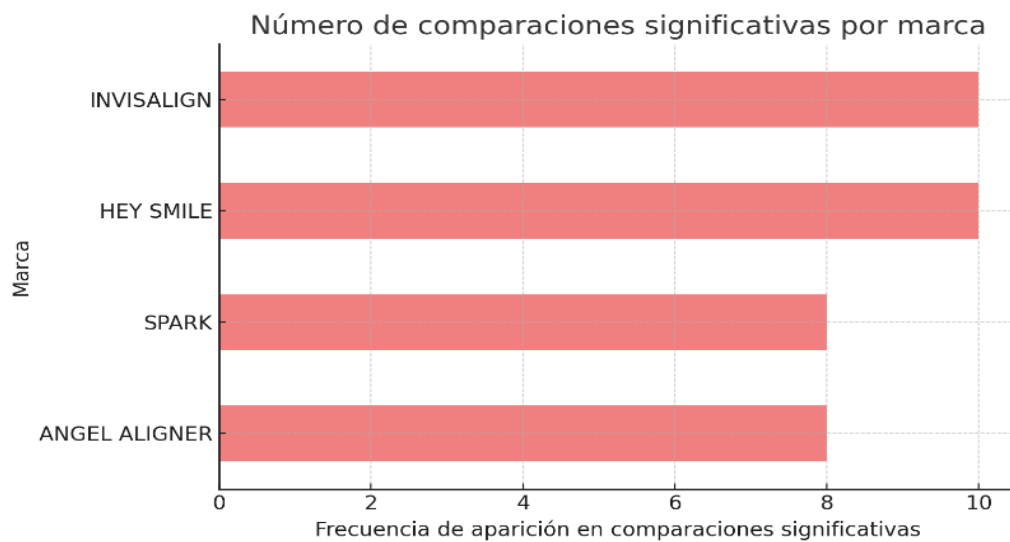


Figura 10. Número de comparaciones significativas por marca.

5.7. PRECISIÓN CLÍNICA.

		T2-T1		T3-T1		T3-T2		<i>Clinical Accuracy</i>	
		Mean±SD		Mean±SD		Mean±SD		p-value	%
SUP-13-23	INVISALIGN	2,80	1,76	1,10	1,49	1,70	1,30	<0,01**	39,29
	SPARK	2,26	1,84	1,20	1,18	1,06	1,08	<0,01**	53,10
	ANGEL ALIGNER	2,66	1,79	1,52	1,19	1,14	1,61	<0,01**	57,14
	HEY SMILE	3,39	1,62	1,84	1,69	1,54	0,61	<0,01**	54,28
SUP-14-24	INVISALIGN	4,14	2,11	2,48	1,85	1,66	1,49	<0,01**	59,90
	SPARK	3,02	2,26	1,68	1,78	1,34	1,34	<0,01**	55,63
	ANGEL ALIGNER	3,34	2,38	2,09	1,41	1,25	1,79	<0,01**	62,57
	HEY SMILE	3,71	1,47	2,24	1,37	1,47	0,55	<0,01**	60,38
SUP-15-25	INVISALIGN	3,87	1,94	2,42	1,56	1,46	1,42	<0,01**	62,53
	SPARK	2,90	3,22	1,89	1,55	1,01	2,76	<0,01**	65,17
	ANGEL ALIGNER	2,65	1,88	1,56	1,18	1,09	1,38	<0,01**	58,87
	HEY SMILE	3,96	1,83	2,57	1,81	1,39	0,72	<0,01**	64,90
SUP-16-26	INVISALIGN	2,85	1,61	1,60	1,45	1,25	1,34	<0,01**	56,14
	SPARK	2,88	2,26	1,58	1,28	1,31	1,62	<0,01**	54,86
	ANGEL ALIGNER	2,47	2,05	1,29	1,67	1,18	1,84	<0,01**	52,23
	HEY SMILE	2,94	1,72	1,62	1,09	1,32	1,31	<0,01**	55,10
INF-33-43	INVISALIGN	2,19	1,88	1,11	1,54	1,08	1,22	<0,01**	50,68
	SPARK	1,85	1,91	1,19	1,33	0,66	1,02	<0,01**	64,32
	ANGEL ALIGNER	2,53	2,61	1,46	1,16	1,08	2,27	<0,01**	57,71
	HEY SMILE	2,60	2,04	1,43	1,24	1,17	1,07	<0,01**	55,00
INF-34-44	INVISALIGN	2,70	2,27	1,61	2,03	1,09	1,01	<0,01**	59,63
	SPARK	3,10	2,68	2,06	2,37	1,04	1,29	<0,01**	66,45

INF-35-45	ANGEL ALIGNER	3,14	1,87	2,12	1,50	1,01	1,37	<0,01**	67,52
	HEY SMILE	3,70	2,21	2,41	1,85	1,29	0,80	<0,01**	65,14
	INVISALIGN	3,16	2,58	2,08	1,97	1,09	1,52	<0,01**	65,82
	SPARK	3,01	2,31	1,60	1,63	1,41	1,50	<0,01**	53,16
	ANGEL ALIGNER	3,28	2,15	2,26	1,77	1,01	1,62	<0,01**	68,90
	HEY SMILE	4,00	1,63	2,64	1,10	1,37	0,86	<0,01**	66,00
	INVISALIGN	2,53	2,45	1,60	1,77	0,93	1,74	<0,01**	63,24
	SPARK	2,91	2,17	1,79	1,98	1,12	1,18	<0,01**	61,51
INF-36-46	ANGEL ALIGNER	2,36	2,16	1,30	1,51	1,06	1,43	<0,01**	55,08
	HEY SMILE	3,29	3,12	1,92	2,54	1,37	0,99	<0,01**	58,36

Tabla 18. Clinical Accuracy

La tabla 18 muestra:

- T2 – T1: Expansión planificada en mm.
- T3 – T2: Expansión real lograda en mm.
- T3 – T2: Diferencia de planificación. (Sobreestimación del Software).
- P – value: Significancia estadística entre T3 – T2 y T2 – T1.
- Clinical Accuracy (%): Precisión clínica = $(T3 - T1 / T2 - T1) \times 100$.

5.7.1. Análisis por segmento y marca.

- SUP 13-23:
 - Invisalign® tiene la menor precisión clínica (39,29%) lo que indica una alta sobreestimación.
 - Spark® y Angel Aligner® tienen mayor precisión (53,10% y 57,14%) con menor diferencia de planificación.

- HeySmile® planifica más (3,39mm) pero no logra alcanzarlo completamente (54,28%).
- SUP 14-24:
 - Angel Aligner® tiene la mayor precisión (62,57%) lo que indica un staging bien ajustado.
 - Invisalign® y HeySmile® tienen precisión similar (59,90% y 60,38%).
 - Spark® tiene la menor precisión (55,63%).
- SUP 15-25:
 - Spark® tiene la mayor precisión (65,17%) lo que indica un mejor control del torque.
 - HeySmile® también tiene alta precisión (64,90%).
 - Angel Aligner® tiene la menor precisión (58,87%).
- SUP 16-26:
 - Invisalign® tiene la mayor precisión (56,14%) lo que sugiere un mejor control en molares superiores.
 - Angel Aligner® tiene la menor precisión (52,23%).
- INF 33-43:
 - Spark® tiene la mayor precisión (64,32%) lo que indica un mejor control de torque.
 - Invisalign® tiene la menor precisión (50,68%).
- INF 34-44:
 - Angel Aligner® tiene la mayor precisión (67,52%) lo que indica un staging muy eficiente.
 - Spark® también tiene alta precisión (66,45%).
 - Invisalign® tiene la menor precisión (59,63%).

- INF 35-45:
 - Angel Aligner® tiene la mayor precisión (68,90%) lo que indica un mejor control del movimiento.
 - Spark® tiene la menor precisión (53,16%).
- INF 36-46:
 - Invisalign® tiene la mayor precisión (63,24%) lo que sugiere un mejor control en molares inferiores.
 - Angel Aligner® tiene la menor precisión (55,08%).

5.7.2. Promedio por arcada.

- Invisalign® superior: 54.465%.
- Invisalign® inferior: 59.842%.
- Spark® superior: 57.19%.
- Spark® inferior: 61.36%.
- Angel Aligner® superior: 57.70%.
- Angel Aligner® inferior: 62.302%.
- HeySmile® superior: 58.665%.
- HeySmile® inferior: 61.125%.

5.7.3. Promedio general por marca.

- Angel Aligner®: 60.002%.
- HeySmile®: 59.895%.
- Spark®: 59.275%.
- Invisalign®: 57.150%.

5.7.4. Planificación.

- Podemos observar que la marca HeySmile® es la que más mm planifica en todos los segmentos, excepto en SUP 14-24 donde es superada por Invisalign®. En varios de los segmentos planifica más de 1mm que otras marcas.
- Aun así la marca HeySmile® se posiciona en 2º lugar en el total de todas las marcas respecto a la predictibilidad.

Clinical Accuracy.

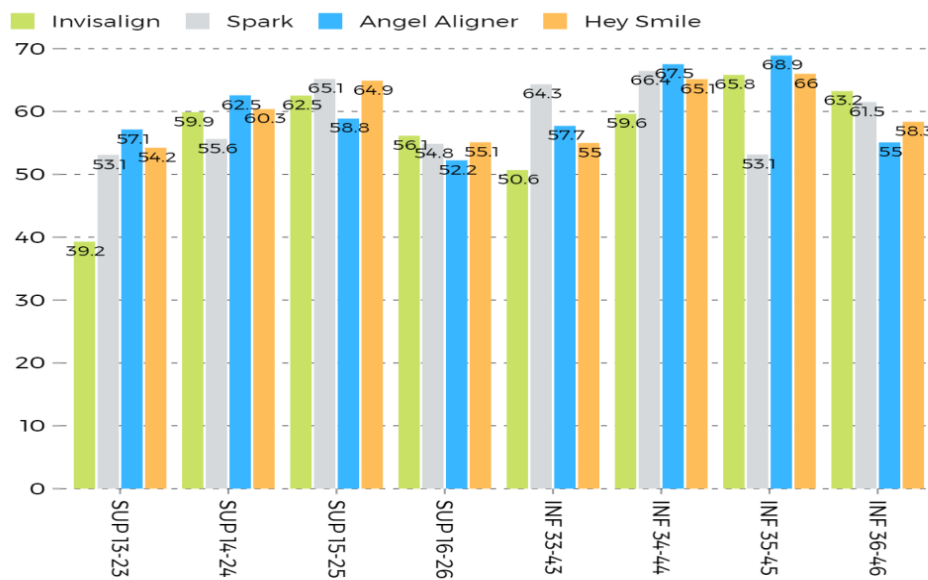


Figura 12. Clinical Accuracy.

VI – DISCUSIÓN

VI -DISCUSIÓN

6.1. EFICACIA Y PREDICTIBILIDAD GLOBAL DE LA EXPANSIÓN TRANSVERSAL CON ALINEADORES.

6.1.1. Contexto y problema clínico.

La introducción de los AT transformó la práctica ortodóncica desde un enfoque centrado en la estética y el confort hacia protocolos cada vez más complejos y estandarizados. No obstante, la expansión transversal, especialmente en adultos, continúa mostrando variabilidad entre la planificación digital y el resultado clínico lo que obliga con frecuencia a refinamientos y, por tanto, a tiempos de tratamiento más largos. Esta diferencia entre lo prescrito y lo logrado no cuestiona la eficacia (capacidad de generar expansión), sino su predictibilidad (grado de expresión de lo planificado) [1, 2].

En nuestra cohorte de 100 adultos multimarca (Angel Aligner®, Invisalign®, Spark® y HeySmile®), observamos una precisión clínica global en un rango del 57% (arcada superior) - 61% (arcada inferior).

Por segmento interdental: caninos 53.5%, 1º premolares 62.29%, 2º premolares 63.34% y 1º molares 57.12%.

Por marcas: Angel Aligner® 60.00%, HeySmile® 59.90%, Spark® 59.28% e Invisalign® 57.15%.

Estas cifras sitúan nuestros resultados dentro del rango de predictibilidad reportado por la literatura contemporánea y permiten contrastar los patrones por segmentos y por arcada.

6.1.2. Evidencia clínica y umbrales de referencia.

La evidencia clínica inicial sobre la predictibilidad de los AT se concentra casi en exclusiva en Invisalign®, sistema pionero en el mercado y el más ampliamente investigado en la literatura.

El estudio de Kravitz & Cols [26] fue la primera referencia clínica prospectiva y reportó una eficacia global del 40.5% para los movimientos planificados con especial dificultad en la expansión anterior (36% en caninos).

Posteriormente el mismo grupo [27] repitió el análisis en 2020 y encontró una mejora relativa con valores de predictibilidad en torno al 57-58% en el arco superior y 61% en premolares, cifras muy similares a las encontradas en nuestro trabajo.

Otras investigaciones posteriores como la de Houle & Cols [25], Tien & Cols [28], Vidal-Bernárdez & Cols [15] o Lione & Cols [33] han seguido la misma tendencia: la mayoría centrada en Invisalign con reportes de eficacia media entre el 55-70% siempre con diferencias según el segmento dental siendo mejor en premolares que en caninos y molares.

En este contexto es importante subrayar que la casi totalidad de los estudios publicados analizan exclusivamente Invisalign® lo que limita la visión integral de la predictibilidad de la expansión con AT.

Nuestro trabajo aporta una novedad relevante ya que constituye uno de los pocos estudios comparativos entre diferentes marcas de AT (Angel Aligner®, HeySmile®, Spark® e Invisalign®) permitiendo establecer diferencias intersistemas que no habían sido exploradas en la literatura previa.

Este diseño comparativo nos sitúa en una posición singular dentro de la evidencia actual ampliando el marco de referencia más allá de Invisalign® y ofreciendo una visión clínica más representativa del mercado real de alineadores.

<i>Autor / Año/ Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Kravitz (2009) [26]	Invisalign®	Eficacia global 40.5%, caninos 36%	Nuestros valores son más altos (57-61% global, 53.5% caninos) lo que refleja una mejora respecto a la 1º generación.
Houle (2017) [25]	Invisalign®	Expansión coronaria 78% vs 40% apical.	Coincide en que la expansión es principalmente tipping.
Haouli (2020) [27]	Invisalign®	Eficacia global 57-58%, premolares hasta 66%.	Valores casi idénticos a los nuestros (57-61%) premolares 62-63%.
Tien (2023) [28]	Invisalign®	Predictibilidad media en expansión 55-65%	Nuestro rango (57-61%) se encuentra dentro de esas cifras.
Vidal-Bernárdez (2021) [15]	Invisalign®	Recomienda no planificar más de 2-3 mm por hemiarcada.	En nuestra serie la diferencia media T3-T2 fue de 1.2-1.5 mm lo que justifica esa limitación.
Lione (2021) [33]	Invisalign®	Desarrollo transversal maxilar reproducible, en premolares más predecibles.	Coincide con nuestro estudio en que los premolares fueron el grupo más fiable.
Rocha (2023) [13]	Invisalign®	Expansión coronal predecible, eficacia variable según biotipo.	También observamos variabilidad Inter paciente.
Macri (2025) [23]	Invisalign®	CBCT: expansión coronal > apical.	Apoya nuestra interpretación de que las medidas cuspídeas reflejan principalmente tipping
Suárez (2025)	Angel Aligner® HeySmile® Spark® Invisalign®	Predictibilidad global 57-61% Premolares más predecibles. Diferencias Inter marca.	Aporta comparación multimarca siendo uno de los pocos estudios que no se limita solo a Invisalign®.

Tabla 19. Cuadro comparativo- Evidencia clínica publicada sobre predictibilidad de expansión con AT.

6.2. BIOMECÁNICA Y CONTROL DEL TORQUE EN LA EXPANSIÓN CON AT.

6.2.1. Biomecánica del movimiento transversal.

La literatura reciente [5, 6, 17, 36] subraya que el movimiento de expansión con AT se caracteriza predominantemente por tipping y no por traslación radicular. Catroflorio & Rossini [5] describen que el centro de resistencia radicular queda demasiado apical para que la fuerza del AT aplicada en el margen coronal logre un movimiento corporal. Catroflorio & Cols [6] añadieron que el diseño del staging y los ataches condicionan la predictibilidad observando que la precisión puede descender hasta el 50% cuando el plan no contempla torque vestibular.

Nuestros hallazgos (57.01% superior y 61.16% inferior) confirman esta tendencia: la expansión se expresa en mayor medida a nivel coronal, siendo los premolares (62-63%) los que mejor convierten lo prescrito en movimiento real mientras que caninos (53.5%) y molares (57.1%) muestran mayor discrepancia, coherente con el predominio del tipping descrito en la literatura referida.

6.2.2. Influencia de la curva de Wilson y la inclinación coronal.

Goh & Cols [30] evaluaron la curva de Wilson y el torque mandibular con Invisalign® concluyendo que la expresión de la expansión está íntimamente ligada al cambio en la inclinación coronal más que a la ganancia real de perímetro. Reportaron que la corrección de la curva de Wilson es parcial y depende de la magnitud del torque programado.

En nuestra muestra los premolares inferiores (64-69%) son los más predecibles lo cual es consistente con el hecho de que en el arco inferior la geometría favorece una inclinación vestibular efectiva pero no necesariamente una expansión radicular homogénea.

6.2.3. Grosor y diseño del alineador.

Li & Cols [17] mostraron mediante FEA que el grosor del alineador y el patrón del staging influyen en la distribución de fuerzas: un mayor grosor aumenta el torque vestibular transmitido, pero también genera mayor estrés periodontal.

Asimismo, Yao & Cols [18] comprobaron que añadir torque en molares mejora la predictibilidad de la expansión, aunque con coste biomecánico.

Nuestros resultados con valores en molares de 55-59% se alinean con la evidencia que indica que sin un refuerzo de torque vestibular la predictibilidad molar es baja.

6.2.4. Rol de ataches y configuraciones.

Karsli & Cols [37] confirmaron que las configuraciones de ataches en molares modifican sustancialmente la respuesta. Ciertos diseños aumentan el control radicular y reducen el tipping.

En nuestro estudio donde se estandarizó el protocolo de ataches las diferencias entre marcas sugieren que la variabilidad en la biomecánica interna del software (no en los ataches en sí) puede modular la predictibilidad.

6.2.5. Evidencia de modelos FEA y estudios tridimensionales.

Diversos trabajos aportan una visión tridimensional del fenómeno:

- Mao & cols [24] demostraron el rebote elástico del material tras la expansión lo que explica pérdidas de precisión del hasta el 20% si no se programa sobre corrección.
- Zhang & cols [38] evidenciaron que los patrones de “stride”, (que representan los distintos modos de desplazamiento dental bajo fuerzas de expansión: tipping puro, tipping controlado y traslación. Estos patrones confirman que la mayoría de la expansión con AT corresponde a inclinación coronal más que a un movimiento radicular completo) y torques aplicados modifican la dirección diseños mecánicos que mejoran la traslación.
- Chen & cols y Kim & cols [39, 40] ofrecen diseños y movimientos multietapa con modelos FEA.

Estas simulaciones confirman lo observado clínicamente en nuestra cohorte. Incluso con softwares avanzados la precisión raramente supera el 65-70% salvo en premolares y el control radicular sigue siendo la limitación central.

6.2.6. Comparación con nuestro estudio.

Nuestros datos reafirman que la predictibilidad de la expansión no depende únicamente de la marca del alineador sino del equilibrio biomecánico entre fuerzas coronales, torque compensatorio, grosor del material y geometría radicular. La concordancia con los estudios de FEA y análisis clínicos es clara: Expansión efectiva a nivel coronal, limitaciones radiculares, necesidad de sobre corrección.

<i>Autor / Año/ Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Castroflorio & Rossini (2024) [5]	Revisión general centrada en Invisalign® y biomecánica de AT en general.	La expansión con AT es principalmente tipping coronal. Traslación limitada.	Coincide con que nuestros valores (57-61%) reflejan expansión coronal más que radicular.
Castroflorio (2023) [6]	Invisalign®	El diseño del tratamiento afecta a la predictibilidad. La precisión puede bajar a50% sin torque vestibular.	Nuestras referencias en caninos (53.5%) confirman esta limitación.
Goh (2023) [30]	Invisalign®	Corrección parcial de la curva de Wilson. Depende del torque programado.	Explica por qué en nuestra muestra los premolares inferiores (64-69%) fueron más predecibles.

Inchiongo (2023) [36]	Nuvola®	Predictibilidad variable. Mejor en premolares. Tipping predominante.	Mismo patrón en nuestro estudio: Premolares 62-63%.
Li N. (2024) [17]	Modelos FEA.	FEA: mayor grosor del AT = más torque vestibular pero mayor estrés.	Relaciona la baja predictibilidad molar (55-59%) con insuficiente torque si el grosor no se optimiza.
Mao B. (2023) [24]	Modelos 3D. Modelos FEA.	Rebote de AT genera pérdida de precisión de hasta 20%.	Explica la diferencia entre T3-T2 en nuestros datos y la necesidad de sobre corrección.
Zhang (2023) [38]	Modelos FEA.	El torque y el “stride” afectan el vector de expansión.	Corroboran nuestras cifras moderadas en molares (57%)
Yao S. (2023) [18]	Modelos FEA.	Añadir torque vestibular mejora la predictibilidad de expansión.	Respaldaría protocolos más agresivos en caninos y molares de nuestra cohorte
Chen J. (2024) [39]	Modelos FEA	Los diseños multietapa mejoran la traslación anterior.	Sugiere estrategias de staging avanzadas que podrían mejorar nuestros resultados en caninos.
Kim K. (2025) [40]	Modelos FEA.	Los protocolos compensatorios multietapa optimizan los movimientos en FEA.	Relevante para planificar refinamientos en nuestro estudio.
Karsli N. (2024) [37]	Modelos FEA con diferentes configuraciones de attaches.	Los attaches en molares modifican las fuerzas y reducen el tipping.	Explica por qué, pese a protocolos estandarizados, nuestros molares (57%) son menos predecibles.

Tabla 20. Cuadro comparativo- Biomecánica y control del torque en la expansión con AT.

6.3. EXACTITUD CLÍNICA VS EFICACIA, NECESIDAD DE SOBRE CORRECCIÓN Y REFINAMIENTOS.

6.3.1. Discrepancia entre lo planificado y la realidad clínica.

Diversos estudios clínicos confirman que existe una brecha sistemática entre lo predicho por el software y lo conseguido en boca. Tiene & Cols [28] demostraron que la predictibilidad de expansión con Invisalign® es incompleta. Aunque se logran incrementos transversales, la media de precisión se situó en torno al 55-65%. Vidal-Bernárdez & Cols [15] confirmaron resultados similares recomendando no planificar más de 2-3 mm de expansión por hemiarcada para evitar riesgo periodontal.

Nuestros hallazgos (57-61%) coinciden con estas cifras y validan la necesidad de moderación en la prescripción digital sobre todo en caninos (53.5%) donde la discrepancia fue mayor.

6.3.2. Evidencia de estudios CBCT y análisis tridimensional.

Macrì & cols [23] mediante CBCT observaron que la expansión ocurre tanto a nivel coronal como radicular pero la ganancia apical fue significativamente menor. Esto confirma el predominio de tipping ya señalado anteriormente. En nuestra cohorte las medidas cuspídeas mostraron expansión, pero no se evaluó el movimiento radicular lo cual limita la interpretación biomecánica.

Robertson & cols [41] en su revisión sistemática destacaron la variabilidad interindividual con valores de predictibilidad que oscilan entre el 40-80% y enfatizaron la influencia de la geometría dental y el biotipo periodontal. Esta dispersión explica por qué incluso dentro de un mismo arco, nuestra predictibilidad varía entre el 53% y el 63% según el segmento.

6.3.3. Necesidad de sobre corrección y refinamientos.

Bouchant & cols [11] y Putrino & Cols [42] concluyeron que la expansión con AT no es completamente predecible recomendando sobrecorrección. Charalampakis & Cols [43] confirmaron clínicamente que la discrepancia fue

mayor en canino y que la mayoría de los pacientes requirió refinamientos adicionales.

En nuestra cohorte todas las diferencias entre T3-T2 fueron estadísticamente significativas ($p < 0.05$) lo cual refleja que incluso con protocolos estandarizados la primera serie de AT no es suficiente para lograr la totalidad de lo planificado.

6.3.4. Validación del software de planificación.

Ghislanzoni & cols [44] evaluaron la capacidad del ClinChek para predecir la realidad clínica y hallaron sobreestimación sistemática, especialmente en el sector anterior. Ali & Miethke [3] ya habían señalado limitaciones en la predicción de movimientos complejos pese a la innovación del sistema.

Nuestros datos confirman esta tendencia. La planificación digital predijo más expansión de la obtenida con una diferencia media entre T3-T2 de 1.2-1.5 mm en la mayoría de los segmentos.

6.3.5. Evidencia en movimientos específicos y otros sistemas.

Los trabajos centrados en movimientos particulares coinciden en señalar variabilidad de predictibilidad.

- Simon & cols [45] reportaron precisión limitada en torque y distalización lo cual es extrapolable a la expansión.
- Koletsi & cols [46] en una revisión sobre rotaciones, mostraron que la predictibilidad raramente supera el 50% apoyando la idea de que movimientos complejos requieren refinamientos.
- Al-Balaa & cols [47] y Krieger & cols [48] confirmaron con CBCT que los incisivos y caninos presentan mayor discrepancia.
- Grünheid & cols [49] observaron que Invisalign® no alcanza completamente las posiciones predichas en casos sin extracciones.
- Jiang & cols [50] y Tepedino & cols [51] señalaron limitaciones en el control de tipping anterior análogo al problema transversal en molares.
- Fiori & cols [52] mostraron que incluso en resoluciones de apiñamientos la predictibilidad es variable (60-70%).

- Levrini & Cols [53] confirmaron que en pacientes pediátricos con Invisalign® la predictibilidad es mayor en etapas tempranas de desarrollo, probablemente por mayor plasticidad ósea.

6.3.6. Comparación con nuestro estudio.

En conjunto nuestros resultados encajan con el consenso de que:

1. La predictibilidad de la expansión con AT es parcial (55-65%)-
2. Se requiere sobre corrección digital y refinamientos para alcanzar objetivos.
3. Los caninos son los menos predecibles y los premolares los más fiables.
4. La validación del software confirma sobreestimación sistemática de los resultados.

<i>Autor Año Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Tien (2023) [28]	Invisalign®	Predictibilidad global 55-65%	Coincide con que nuestros valores (57-61%)
Vidal-Bernárdez (2021) [15]	Invisalign®	Recomiendan no planificar más de 2-3 mm por hemiarcada.	Refuerza que nuestras diferencias T3-T2 de 1.2-1.5 mm justifican sobre corrección.
Macri (2025) [23]	Invisalign®	CBCT indica que la expansión coronal es mayor que la radicular (que está limitada).	Explica que nuestras medidas cuspídeas no reflejan totalmente el control radicular.
Robertson. (2020) [41]	Mayoritariamente Invisalign®	Predictibilidad variable (40-80%).	Nuestros valores (53-63%) se sitúan en el rango medio-alto.

		Depende del biotipo periodontal y de la geometría dental.	
Bouchant. (2023) [11]	Invisalign®	La expansión con Invisalign® no es totalmente predecible y se necesita sobre corregir.	Apoya la recomendación de planificar más del 100% de lo buscado en canino y molares.
Putrino (2021) [42]	Mayoritariamente Invisalign®.	Los AT requieren refinamientos frecuentes.	En nuestra cohorte todas las diferencias entre T3-T2 fueron significativas.
Charalampakis (2018) [43]	Invisalign®	Caninos con mayor discrepancia. Refinamientos casi universales.	Nuestros caninos fueron los menos predecibles.
Ghislanzoni. (2024) [44]	Invisalign®	El ClinChek sobreestima los resultados clínicos.	Coincide con nuestros resultados. Nuestras predicciones T2 superaron los resultados T3.
Ali SA & Miethke HR. (2012) [3]	Invisalign®	Invisalign® es innovador pero limitado en movimientos complejos.	Nuestro estudio confirma limitaciones en caninos y premolares.
Simon. (2014) [45]	Invisalign®	Torque y distalización poco predecibles con alineadores.	Analógicamente la expansión molar en nuestro estudio se limitó al 57%.
Koletsi (2021) [46]	Mayoritariamente Invisalign®	Predictibilidad del 50% en rotaciones.	Paralelo a nuestras bajas cifras en caninos
Al-Balaa (2021) [47]	Invisalign®	CBCT. Discrepancias y limitaciones clínicas en caninos.	Similar a nuestro estudio.

Krieger (2012) [48]	Invisalign®	Invisalign no logra plenamente movimientos en anteriores	Coincide con nuestras discrepancias en caninos
Grünheid (2017) [49]	Invisalign®	Invisalign no alcanza posiciones predichas en casos sin extracciones	Corroborar la necesidad de refinamientos en nuestra muestra.
Jiang (2021) [50]	Invisalign®	El tipping en anteriores predomina sobre la traslación	Fenómeno idéntico en nuestra muestra.
Tepedino 2018) [51]	Invisalign®	Movimientos en anteriores con precisión limitada	Analogía: Caninos menos fiables en nuestra muestra
Fiori (2022) [52]	Invisalign®	Apiñamientos resueltos con el 60-70% de precisión.	Valores parecidos a los nuestros en premolares
Levrini (2021) [53]	Invisalign® First	Predictibilidad mayor por plasticidad ósea	Nuestros adultos no alcanzan esa precisión

Tabla 21. Cuadro comparativo - Exactitud clínica, sobrecorrección y refinamientos.

6.4. FIABILIDAD DE LAS MEDICIONES DIGITALES Y VALIDEZ DE LOS FLUJOS CAD/CAM.

6.4.1. ¿Por qué importa medir bien en expansión transversal?

En estudios de predictibilidad la calidad del dato es tan crítica como la biomecánica. Si el error de medición (intra/inter observador, método y software) es alto, las diferencias entre T3-T2 pueden ser artefactos.

En esta tesis hemos trabajado con modelos STL y medidas lineales cuspídeas (IC, IP1, IP2, IM) obtuvimos ICC altos en premolares y molares (≥ 0.90) y buenos en caninos (≥ 0.73).

Esta sección pretende contrastar nuestros procedimientos y fiabilidad con la literatura específica sobre método, software y analítica.

6.4.2. Reproducibilidad Inter método: manual vs digital vs apps

Alvarado-Lorenzo & cols [54] compararon medición manual, digital y app-based y hallaron que los métodos digitales presentan mejor reproducibilidad y menor variabilidad que los manuales, con ICC altos para dimensiones transversales.

Este hallazgo respalda el uso de STL + Software en investigaciones de expansión y sugiere que las décimas de milímetro que solemos reportar son detectables por encima del ruido del método siempre que haya estandarización de puntos anatómicos.

6.4.3. Validez del enfoque cuspídeo y elección del software.

Dos decisiones metodológicas condicionan la fiabilidad.

1. Dónde medir.
 2. Con qué medir.
- Morales- Burruezo & Cols [31] al evaluar la expansión con Invisalign® confirmaron que las medidas cuspídeas son consistentes y sensibles al cambio clínico, pero advierten que no capturan por sí solas el componente radicular.
 - En la misma línea revisiones y experiencias de flujo CAD/CAM señalan que herramientas de las casas comerciales y software externo (p.e Exocad, MeshLab) ofrecen precisión submilimétrica cuando se usan puntos bien definidos y protocolos claros de orientación del modelo. [28, 31].

En esta tesis optamos por puntos cuspídeos en Exocad por su trazabilidad clínica (lo que ve el clínico es la apertura Inter cuspídea) y por la consistencia

Inter modelo. Aceptamos como limitación que el tipping puede inflar la ganancia lineal respecto a una posible traslación.

6.4.4. Desarrollo transversal y fiabilidad en series clínicas.

Lione & Cols [33] documentaron desarrollo maxilar con Invisalign® y enfatizaron que la consistencia de la medición es clave para comparar planificación vs resultado. Sus datos muestran mejores tasas en premolares tal y como observamos y sustentan que la metodología digital puede discriminar diferencias entre segmentos.

6.4.5. De la métrica a la predicción: El papel del “machine learning”

Wolf & Cols (2024) [8] aplicaron “machine learning” (rama de la inteligencia artificial que permite que un programa aprenda a reconocer patrones y hacer predicciones a partir de datos, sin estar programado de forma explícita para cada tarea” para predecir resultados de tratamiento con AT subrayando que la calidad de los datos de entrada (mediciones fiables, puntos consistentes, control de sesgos) es determinante para que los modelos tengan valor clínico. En términos de práctica, integrar métricas limpias (ICC altos, protocolos de marcado) con variables clínicas (biotipo, anatomía radicular) podrían mejorar la estimación de la expresión y permitir sobre correcciones personalizadas.

6.4.6. ¿Es imprescindible el modelo digital para todo?

La revisión de alcance de Pouliezou & cols [55] pregunta si el modelo digital es necesario en todos los procedimientos. Concluye que, aunque no siempre sea imprescindible, en investigación y en casos que exigen precisión métrica (como la expansión y su predictibilidad) los modelos digitales aportan eficiencia, trazabilidad y reproductibilidad superiores.

6.4.7. Encaje con nuestros resultados (ICC y error)

Nuestros ICC altos en premolares y molares (≥ 0.90) y buenos en caninos (0.736) están alineados con Alvaro-Lorenzo & cols [54], Lione & Cols [33] y Morales-Burruezo & cols [31].

- Validan que las diferencias T3-T2 observadas (1.2-1.5 mm en varios segmentos) exceden el error del método.
- Confirman que la jerarquía por segmentos (premolares > molares > caninos) no se debe al ruido sino a la biomecánica.
- Señalan un área de mejora. Los caninos donde el marcado del punto es más sensible a la variación y el tipping puede sesgar la métrica lineal.
- Implicación: Mantener un único operador, plantillas de puntos, orientación estándar del STL, aunque el software Exocad te permite manejar el STL en 3D lo que da una fiabilidad mayor y cuando sea factible complementar con estimaciones radiculares (CBCT/FEA) para separar tipping de traslación.

Podemos concluir que la evidencia sustenta que las mediciones digitales en STL (con protocolos estandarizados y software validado) ofrecen fiabilidad suficiente para detectar las diferencias clínicamente relevantes de la expansión con alineadores. En esta tesis, los ICC y un único operador avalan que las discrepancias T3-T2 no son artefactos de medición.

La métrica cuspídea es adecuada para evaluar la expresión clínica. Cuando el objetivo sea valorar traslación radicular, deben añadirse métricas apicales con CBCT.

<i>Autor Año Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Alvarado-Lorenzo (2024) [54]	General (comparación de métodos, no de marca específica)	Digital/App con ICC altos y menor variabilidad que métodos manuales para medidas de arco.	Respaldan nuestro uso de STL + Exocad y los ICC reportados (≥ 0.90 premolares/molares. 0.736 caninos)
Lione R. (2021) [33]	Invisalign®	Desarrollo maxilar con Invisalign® medido de forma reproducible, premolares con mejor expresión.	Coherente con nuestra mayor predictibilidad en premolares (62-63%) y con la utilidad del flujo digital
Morales-Burruezo (2020) [31]	Invisalign®	Las medidas cuspídeas son sensibles y reproducibles. Reflejan tipping mejor que traslación.	Justifica nuestra métrica cuspídea y la interpretación de expansión predominantemente dentoalveolar.
Wolf D. (2024) [8]	General (IA aplicada a AT mayoritariamente Invisalign®)	“Machine Learning” predice resultados si las mediciones son fiables.	Apoya usar nuestras mediciones con ICC altos para modelos predictivos y ajustar sobre corrección.
Pouliezou I. (2024) [55]	Revisión general. Sin marca específica.	El modelo digital no es siempre obligado, pero en expansión mejora la trazabilidad y reproductibilidad.	Refuerza nuestra elección metodológica.

Tabla 22. Cuadro comparativo - Fiabilidad de mediciones digitales y validez CAD/CAM.

6.5. PACIENTES EN DENTICIÓN MIXTA/ADOLESCENTES Y COMPARACIÓN CON RME/MARPE.

6.5.1. Expansión en pacientes en crecimiento vs adultos.

La predictibilidad de la expansión con alineadores no puede analizarse de forma homogénea en todas las edades. La plasticidad ósea en niños y adolescentes facilita la respuesta transversal mientras que en adultos predomina la resistencia esquelética y cortical. Por ello, la literatura distingue con claridad entre:

- Dentición mixta/adolescente → expansión más eficaz, mayor parte dentoalveolar con cierto componente esquelético.
- Adultos → expansión fundamentalmente dentoalveolar por tipping con menor precisión y necesidad de refinamientos o técnicas quirúrgicas complementarias.

Nuestra cohorte se compuso únicamente de adultos por lo que las comparaciones deben hacerse con cautela.

6.5.2. Estudios en dentición mixta y comparación con RME.

El trabajo de Bruni & cols [19] en un ensayo clínico aleatorizado en niños con dentición mixta comparó AT vs disyuntores. Concluyeron que los RME generaban mayores aumentos en volumen y superficie palatina mientras que los AT sí lograron expansión, pero de menor magnitud.

Pamukçu & cols [56] también compararon en dentición mixta AT vs expansores acrílicos. Encontraron que ambos métodos producían aumentos transversales pero los AT resultaban en cambios más limitados y fundamentalmente dentoalveolares mientras que los aparatos convencionales inducían cambios más significativos a nivel basal.

En la misma línea Levrini & cols [53] evaluaron Invisalign® First y confirmaron que en población pediátrica la predictibilidad de la expansión era mayor que en adultos atribuida a la menor densidad ósea y a la actividad de la sutura media palatina aún presente.

Nuestros datos en adultos (57-61%) son por tanto más modestos que los descritos en poblaciones en crecimiento, lo cual confirma la importancia del factor biológico en la predictibilidad.

6.5.3. Evidencia en expansión mixta con AT.

El estudio retrospectivo de Loberto & cols [34] en dentición mixta mostró que la predictibilidad de la expansión en ambas arcadas con AT era variable y frecuentemente inferior al 60% con marcada necesidad de refinamientos.

Bruni & Cols [19] en población similar, confirmaron que la predictibilidad en el maxilar superior estaba condicionada por el biotipo y que los premolares eran los segmentos más fiables.

Esto coincide con nuestro hallazgo en adultos. Premolares como grupo más predecible, aunque en niños las cifras tienden a ser algo más elevadas gracias a la plasticidad ósea.

6.5.4. Técnicas esqueléticas: MARPE y SARPE.

Cuando la discrepancia esquelética es significativa los AT no son suficientes.

Kurnaz & cols [57] mediante el análisis por elementos finitos confirmaron que los disyuntores rápidos inducen cambio esqueléticos netos, mientras que los AT generan principalmente movimientos dentoalveolares.

Lázaro & cols [16] en su metaanálisis sobre MARPE en adolescentes tardíos y adultos jóvenes mostraron que el éxito de la expansión esquelética depende de la apertura de la sutura palatina con eficacia significativa dependiendo del estadio.

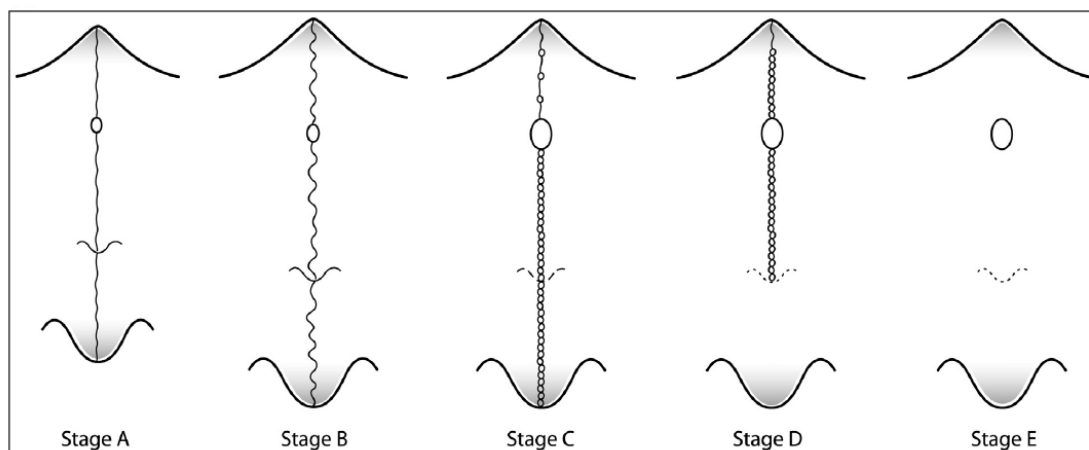


Figura 13. Estadios sutura media palatina [64].

Table II. Distribution of the maturational stages of the midpalatal suture

Stage	5-<11 y		11-<14 y		14-18 y		>18 y		Total
	Female	Male	Female	Male	Female	Male	Female	Male	
A	3	1	0	1	0	0	0	0	5
B	19	3	12	16	3	3	1	0	57
C	2	0	6	7	5	7	3	1	31
D	0	0	1	0	3	3	7	3	17
E	0	0	5	0	8	0	8	9	30
Total	24	4	24	24	19	13	19	13	140

Figura 14. Distribución de los estadios de maduración de la sutura media palatina [64].

Caruso & cols [58] evaluaron la expansión con AT en prepuberales confirmando que en esa franja de edad los AT sí pueden generar cambios transversales consistentes tanto en maxilar como en mandíbula con tasas de predictibilidad mayores a las observadas en adultos.

Estos hallazgos consolidan la idea de que los AT tienen un techo biomecánico en adultos y que en casos con marcada deficiencia transversal la opción debe ser un enfoque esquelético asistido (MARPE/SARPE).

6.5.5. Comparación con nuestro estudio.

En nuestra cohorte adulta la predictibilidad (57-61%) es claramente inferior a las cifras en niños/adolescentes con Invisalign First o en dentición mixta, a menudo > 65%.

Los resultados confirman que la edad y la maduración de la sutura media palatina son factores determinantes de la eficacia y que en adultos la expansión con AT se limita a movimientos dentoalveolares en contraste con los cambios esqueléticos de RME o MARPE.

Esto refuerza la necesidad de una selección diagnóstica rigurosa:

- Niños/Adolescentes → AT pueden ser eficaces en expansión moderada.
- Adultos → AT son útiles para correcciones dentoalveolares leves/moderadas pero insuficientes para deficiencias esqueléticas marcadas.

<i>Autor Año Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Kurnaz M. (2025) [57]	Modelos FEA	FEA: RME induce expansión esquelética y los AT movimientos dentoalveolares	Nuestros adultos muestran expansión dentoalveolar, sin componente esquelético.
Bruni (2025) [19]	Invisalign® (dentición mixta)	RCT en dentición mixta. Premolares más predecibles que molares	Igual patrón que en nuestra tesis

Caruso (2025) [58]	Invisalign® First (prepuberales)	Expansión mandibular y maxilar con AT, predictibilidad elevada (65-88%)	Nuestra cohorte adulta no alcanza esas cifras mostrando límites biológicos
Pamukçu (2024) [56]	Invisalign® (dentición mixta)	Los AT solo consiguen cambios dentoalveolares	Refuerza que en adultos la limitación es aún mayor
Levrini (2021) [53]	Invisalign® First	Predictibilidad superior en niños por plasticidad ósea	Explica la brecha con nuestras cifras en adultos.

Tabla 23 -Cuadro comparativo - poblaciones en dentición mixta y comparación con RME/MARPE

Podemos concluir que la literatura demuestra que la edad y la maduración esquelética determinan la eficacia de la expansión con alineadores.

- En niños y adolescentes la predictibilidad es mayor con AT incluso llega al 88% [50] gracias a la plasticidad ósea.
- En adultos los AT se limitan a la expansión dentoalveolar (55-61%) concordante con nuestros datos.
- Para deficiencias transversales esqueléticas moderadas / severas en adultos es necesario considerar MARPE, SARPE o RME ya que los AT no logran modificaciones óseas suficientes.

6.6. REVISIONES SISTEMÁTICAS, SCOPING REVIEWS Y CONSENSOS.

6.6.1. Síntesis de la evidencia acumulada: ¿Qué tan predecible es la expansión?

Las revisiones y scoping reviews coinciden en dos ideas:

- La expansión con AT es eficaz pero parcialmente predecible.
- La expresión clínica depende del diente, del arco y del diseño biomecánico (ataches, torque, staging).

Papageorgiou & cols [32] y Robertson & cols [41] sitúan la efectividad global de los AT respecto a los aparatos fijos en una zona variable con rango de predictibilidad amplio (40-80%) según el tipo de movimiento con peores cifras en movimientos complejos (rotación, torque, traslación radicular) y mejores en expansión coronal de premolares.

Muro & cols [10], Ma & Wang [59] y Bouchant & cols [11] delimitan para la expansión transversal un rango medio de expresión clínica (55-65%) reforzando la necesidad de sobre corrección y refinamientos.

Aragón & cols [12] (scoping) mapean la heterogeneidad metodológica y señalan como factores de confusión la métrica usada (cúspide vs margen gingival/apical) la edad, el biotipo periodontal y el software.

Encaje con nuestra cohorte: nuestros promedios (superior 57.01% e inferior 61.16%) y el gradiente “premolares > molares/caninos” se ubican exactamente en la banda media descrita por estas síntesis, aportando además comparativa multimarca que la mayoría de las revisiones no exploran con detalle.

6.6.2. ¿Qué dicen las revisiones sobre sobre corrección y refinamientos?

Bouchant & cols [11] y Putrino & cols [42] convergen en que la expansión no es completamente predecible por lo que recomiendan planificar > 100% del objetivo deseado (sobrecorrección) y asumir refinamientos como parte del protocolo.

Ma & Wang [59] subrayan que la magnitud de la sobrecorrección debería individualizarse por segmento dental y arco con premolares requiriendo menos sobrecorrección que caninos y molares.

Esto encaja con nuestro estudio. Nuestras diferencias T3-T2 (1.2-1.5 mm) respaldan la recomendación de sobrecorrección y de un primer refinamiento planificado, especialmente en caninos y molares.

6.6.3. Hacia guías clínicas y consensos.

En consenso de expertos Wang & cols [60] propone principios para elevar la expresión. Torque vestibular compensatorio, staging conservador, control de anclaje, elección de criterio para el grosor material y criterios de refinamiento basados en umbrales cuantitativos.

García-Marín & Cols [61] confirman que el control radicular posterior es el talón de Aquiles y que la predictibilidad molar cae frente a premolares, alineado con nuestras cifras.

Papadimitriou & cols [62] confirman las distintas limitaciones y proponen protocolos.

6.6.4. Heterogeneidad metodológica. Implicaciones para comparar estudios.

Las revisiones insisten en que diferencias de diseño (prospectivo vs retrospectivo), población (adultos vs niños en dentición mixta), métrica (cúspide vs gingival/apical) y software/evaluador inflan la dispersión.

En nuestra tesis los ICC altos y un único operador reducen el sesgo. Aun así, la métrica cuspídea captura sobre todo tipping por lo que el control radicular puede estar infra representado. La recomendación de las revisiones es estandarizar planes de medición y “reporting” (p.ej CONSORT/PRISMA en estudios clínicos y sistemáticos) para que las cifras de predictibilidad sean más comparables.

6.6.5. Mensaje integrador para la práctica clínica.

La expansión con AT en adultos debe comunicarse al paciente como eficaz, pero con expresión parcial y dependiente del segmento. El plan debe incluir

sobrecorrección, attaches orientados al torque y refinamientos. En mixtos/adolescentes la expectativa puede ser superior, pero en discrepancias esqueléticas significativas será preferible MARPE/RME.

<i>Autor Año Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Papageorgiou (2020) [32]	Incluye varios sistemas. Mayoritariamente Invisalign®	Meta-análisis. Eficacia de AT vs fijos variable. Predictibilidad depende del movimiento (40-80%)	Nuestro 57-61% quedan en la banda media esperable.
Papadimitriou (2018) [62]	Invisalign®	Revisión. Limitaciones en movimientos complejos. Necesidad de protocolos.	Corrobora nuestras discrepancias entre T3-T2 y el papel de refinamientos.
Robertson (2020) [41]	Principalmente Invisalign	Revisión. Amplia heterogeneidad. Predictibilidad 40-80% Influencia del biotipo y en segmento.	Nuestros segmentos se ubican en el rango medio- alto 53-63%.
Bouchant (2023) [11]	Invisalign®	Sistemática. Expansión parcialmente predecible. Sobrecorrección y refinamientos recomendados.	Justifica nuestra sobrecorrección en caninos y molares.
Putrino (2021) [42]	Foco en Invisalign®	Scoping. Eficiencia y evolución	Alineado con nuestras diferencias T3-T2

		Refinamientos frecuentes	significativas en todos los segmentos.
Ma & Wang (2023) [59]	Mayoritariamente Invisalign®	Sistemática Resultados consistentes (55-65%) en expansión	Coincide con nuestro 57- 61% Jerarquía premolar>molar>canino
Aragon (2023) [12]	Mayoritariamente Invisalign®	Scoping Heterogeneidad en métricas y poblaciones.	Respaldan nuestros ICC altos y protocolo de medición.
Muro (2023) [10]	Mayoritariamente Invisalign®	Scoping Efectividad con variabilidad. El diseño influye en los resultados.	Nuestro diseño multimarca en adultos añade validez externa a esa conclusión.
Wang (2025) [60]	Mayoritariamente Invisalign®	Consenso. Torque vestibular. Staging gradual. Control de anclaje. Elección del material/grosor. Criterios de refinamiento.	Aplicable para elevar nuestros segmentos débiles hacia un porcentaje mayor.
García-Marín (2025) [61]	Revisión de distintos estudios con Invisalign®	Sistemática. Molares con menor predictibilidad mesiodistal. Control radicular limitado	Reproduce nuestro 57% en molares y apoya más torque/anclaje posterior.

Tabla 24- Cuadro comparativo. Revisiones, scoping y consensos.

Así que las revisiones y consensos sitúan la expansión con AT en adultos como eficaz, pero con predictibilidad media (55-65%) superior en premolares y menor en caninos y molares, con el arco inferior ligeramente más predecible.

La sobrecorrección y los refinamientos no son opcionales sino parte del estándar de calidad y su magnitud debe adaptarse por segmento.

La estandarización de métricas y reportes, alineada con consensos, es clave para mejorar la comparabilidad entre estudios y en clínica para elevar la expresión en los segmentos más desafiantes mediante torque, staging y control de anclaje.

6.7. MATERIALES, FABRICACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LOS AT. IMPLICACIONES CLÍNICAS EN LA PREDICTIBILIDAD.

6.7.1. Influencia del material en la biomecánica.

El material de los alineadores no es un factor neutro. Su resistencia, elasticidad y capacidad de recuperación condicionan la forma en que se transmite las fuerzas al diente.

- Ryu & Cols [9] evaluaron el efecto del termo conformado sobre materiales termoplásticos para AT y concluyeron que tras este proceso se producen cambios en el módulo elástico y en el espesor, reduciendo la fuerza efectiva aplicada en clínica respecto al diseño original. El estudio mostró que los AT pierden hasta un 10-15% de su grosor funcional en zonas críticas, afectando a la magnitud de fuerza transmitida.

En nuestra cohorte la diferencia entre T3-T2 (1.2-15 mm en la mayoría de los segmentos) pueden explicarse en parte por esta pérdida biomecánica derivada del termo conformado y del rebote del material descrito por Mao & cols [24]. La combinación de ambos fenómenos sugiere que incluso un plan digital sufrirá pérdidas inevitables si no se compensa con sobrecorrección.

6.7.2. Estrategias de mantenimiento y su impacto.

El estado del AT durante el uso clínico también modifica su eficacia. La deformación por uso, la acumulación de placa y los hábitos de higiene influyen en su rigidez y capacidad de transmisión de fuerzas.

Lombaro & cols [63] realizaron un análisis SEM comparando nueve estrategias de limpieza para AT F22. Observaron que algún método como las pastillas efervescentes de limpieza y el uso combinado de cepillo + jabón neutro conservaban mejor la superficie del AT, mientras que otros como por ejemplo las pastas abrasivas producían micro fisuras y erosión que reducen la longevidad mecánica.

Si trasladamos esta evidencia a la predictibilidad, un AT que pierde rigidez o sufre micro fisuras puede no expresar completamente el movimiento planificado, aumentando la discrepancia T3-T2. Aunque en nuestra investigación no evaluamos directamente protocolos de higiene, sí recomendamos considerar que la variabilidad clínica inter paciente puede estar modulada por hábitos de limpieza y conservación del alineador.

6.7.3. Impacto clínico para la predictibilidad.

La interacción entre fabricación (termo conformado, propiedades del polímero) y uso clínico (desgaste, limpieza, elasticidad residual) puede explicar una parte de la brecha entre lo planificado y lo alcanzado.

- A nivel poblacional incluso con softwares precisos, los resultados rara vez superan el 65-70% de expresión clínica.
- A nivel individual, un paciente con AT degradados por limpieza inadecuada o uso irregular puede ver reducida aún más la predictibilidad, especialmente en movimientos que requieren fuerzas constantes y sostenidas (expansión, torque y rotaciones).

Nuestros hallazgos de predictibilidad global (54-61%) deben entenderse también a la luz de estas limitaciones materiales, lo que refuerza la necesidad de protocolos clínicos estandarizados de fabricación, control de calidad y educación en higiene para minimizar la pérdida de eficacia mecánica.

<i>Autor Año Ref.</i>	<i>Marca</i>	<i>Resultados principales</i>	<i>Comparativa con nuestro Estudio</i>
Lombardo (2017) [63]	F22	SEM. Mejores resultados: pastillas efervescentes y jabón neutro. Peores resultados: pastas abrasivas.	Explica que parte de la variabilidad inter paciente en predictibilidad puede deberse a desgaste del alineador
Ryu JH. (2018) [9]	Materiales Termoplásticos genéricos	Termo conformado altera las propiedades del material. Pérdida del 10-15% del grosor funcional reduciendo la fuerza transmitida	Justifica en parte nuestras diferencias T3-T2 (1.2-1.5 mm) incluso con planificación óptima

Tabla 25- Cuadro comparativo. Materiales y mantenimiento de los AT.

Así que la predictibilidad de la expansión con AT no depende solo de la biomecánica y el diseño digital, sino de también de factores físico-materiales.

- El termo conformado reduce la fuerza real aplicada.
- El mantenimiento/limpieza influye en la integridad del AT durante el uso.
- Ambos fenómenos contribuyen a la brecha “planificación-realidad clínica).

La integración de nuestros resultados con la literatura muestra que la predictibilidad de la expansión con AT debe interpretarse de forma “segmento-específico”. En adultos la predictibilidad media (57-61%) obliga a planificar sobrecorrecciones, especialmente en caninos y molares y a prever refinamientos como parte del plan.

Los premolares representan el área de mayor fiabilidad.

Entre las marcas:

- Angel Aligner® y HeySmile® ofrecen la mayor expresión clínica.
- Spark® destaca por su consistencia.
- Invisalign® requiere mayor cautela en el diseño de protocolos.

VII – CONCLUSIONES

VII - CONCLUSIONES

- Con base en los resultados de este estudio se puede concluir que existen diferencias significativas entre los movimientos planificados y los logrados.
- Los cambios observados en la arcada inferior fueron mayores que en la arcada superior: la arcada inferior mostró una precisión clínica del 61.16% en comparación con el 57.01% de la superior.
- La marca más predecible en la arcada inferior fue Angel Aligner®.
- Respecto a la predictibilidad por arcadas y marca, la más predecible fue Angel Aligner® en la arcada inferior con una precisión del 62,30%, mientras que en la arcada superior fue HeySmile con un 58,66%.
- Respecto a la predictibilidad general por marcas la primera fue Angel Aligner® con un 60%, la segunda fue HeySmile con un 59.9%, la tercera fue Spark® con un 59.3% y la cuarta fue Invisalign® con una 57.15%.
- El análisis evidenció que el sexo del paciente influye en la precisión de la expansión, mostrando diferencias cuantificables entre hombres y mujeres según el segmento evaluado.
- Es necesario mejorar la predictibilidad de la expansión a nivel clínico para que sea más efectiva en la expansión transversal con alineadores.

VIII - LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VIII - LIMITACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1. LIMITACIONES.

- Naturaleza retrospectiva del estudio:
 - Aunque se emplearon modelos digitales STL de alta precisión y criterios homogéneos de selección, el diseño no prospectivo impide controlar todas las variables clínicas como la adherencia del paciente o el tiempo real de uso de AT.
- Muestra restringida a adultos:
 - La investigación incluyó únicamente a pacientes adultos, por lo que los resultados no son directamente extrapolables a población pediátrica o en dentición mixta, donde la respuesta biológica es distinta y el componente esquelético más favorable.
- Subexpansión y sobreestimación digital:
 - Aunque se cuantificó la diferencia entre T3 -T2 en mm ($SE = 0.66 - 1.54$ mm), los softwares de planificación siguen sin reflejar con exactitud el componente dentoalveolar vs el esquelético, lo que limita la interpretación clínica de la predictibilidad.
- Heterogeneidad biomecánica entre marcas:
 - Cada sistema (Angel Aligner®, HeySmile®, Spark® e Invisalign®) utiliza algoritmos, materiales y protocolos distintos (trimline, staging, espesor del alineador, ataches). Esto introduce variabilidad difícil de estandarizar a pesar de la comparación inter marca.
- Ausencia de evaluación radiológica longitudinal:

- Aunque la literatura reporta riesgos de dehiscencias y fenestraciones en expansión con AT, [33, 85, 90], en nuestro estudio no se realizaron CBCT pre y post tratamiento por lo que los efectos óseos solo pueden inferirse de la bibliografía.
- Medición en cúspides:
 - La decisión metodológica de mediar a nivel de cúspide aporta sensibilidad a los cambios por tipping, pero impide una comparación directa con estudios que usan referencias gingivales o radiculares.
- Tiempo limitado por seguimiento:
 - Los resultados se analizaron al final de la primera fase de AT, sin evaluar estabilidad a largo plazo, sucesivos ni tasas de recidiva.

8.2. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

- Estudios prospectivos multicéntricos:
 - Diseñar ensayos clínicos prospectivos y controlados que incluyan diferentes grupos etarios y permitan estandarizar variables clínicas (adherencia, tiempo de uso, número de refinamientos).
- Integración de imágenes CBCT:
 - Incorporar evaluaciones tridimensionales radiológicas para distinguir con precisión la proporción de movimiento dentoalveolar frente al esquelético y cuantificar riesgos periodontales asociados (dehiscencias y fenestraciones).

- Modelos híbridos y comparativos:
 - Comparar AT frente a RME, MARPE y Fan-RME en poblaciones equivalentes midiendo tanto resultados clínicos como efectos biológicos sobre suturas y corticales.
- Optimización biomecánica digital:
 - Desarrollar softwares que incorporen simulaciones por FEA (Finite Element Analysis) para prevenir mejor el tipping, el torque radicular y la magnitud real de la expansión, evitando la sobreestimación actual.
- Seguimiento longitudinal:
 - Evaluar la estabilidad de los resultados de expansión con AT más allá de la fase activa, incluyendo periodos de retención de 3-5 años.
- Investigación sobre adherencia y comportamiento del paciente:
 - Estudiar el impacto de la colaboración en la predictibilidad transversal integrando parámetros objetivos (sensores de uso, inteligencia artificial aplicada a modelos digitales).
- Nuevos biomateriales:
 - Explorar el papel de polímeros de distinta rigidez o elasticidad en la eficiencia de la expansión transversal, evaluando clínicamente si la diferencia de material se traduce en resultados clínicamente significativos.

IX - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IX - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Halawani RO, Almghrabi EY, Halawani SO, Alzahrani AA, Alghamdi SA, Alasmari WM, et al. *The Evolution of Orthodontic Treatment: From Braces to Aligners*. *Journal of International Crisis and Risk Communication Research*. 2024;7(S6):667–674. doi: 10.63278/jicrcr.vi.1992.
2. Lou T, Mair A. *An historical overview of clear aligner therapy: The evolution of clear aligners*. Oral Health Group. 2020;14.
3. Ali SA, Miethke HR. *Invisalign, an innovative invisible orthodontic appliance to correct malocclusions: advantages and limitations*. *Dent Update*. 2012;39(4):254–260. doi:10.12968/denu.2012.39.4.254
4. Weir T. *Clear aligners in orthodontic treatment*. *Aust Dent J*. 2017;62 Suppl 1:58–62. doi:10.1111/adj.12480
5. Castroflorio T, Parrini S, Rossini G. *Aligner biomechanics: Where we are now and where we are heading for*. *J World Fed Orthod*. 2024;13(2):57–64. doi:10.1016/j.ejwf.2023.12.005
6. Castroflorio T, Sedran A, Parrini S, et al. *Predictability of orthodontic tooth movement with aligners: effect of treatment design*. *Prog Orthod*. 2023;24(1):2. Published 2023 Jan 16. doi:10.1186/s40510-022-00453-0
7. Harandi MT, Abu Arqub S, Warren E, et al. *Assessment of clear aligner accuracy of 2 clear aligners systems*. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2023;164(6):793–804. doi:10.1016/j.ajodo.2023.05.028
8. Wolf D, Farrag G, Flügge T, Timm LH. *Predicting Outcome in Clear Aligner Treatment: A Machine Learning Analysis*. *J Clin Med*. 2024;13(13):3672. Published 2024 Jun 24. doi:10.3390/jcm13133672
9. Ryu JH, Kwon JS, Jiang HB, Cha JY, Kim KM. *Effects of thermoforming on the physical and mechanical properties of thermoplastic materials for transparent orthodontic aligners*. *Korean J Orthod*. 2018;48(5):316–325. doi:10.4041/kjod.2018.48.5.316
10. Muro MP, Caracciolo ACA, Patel MP, Feres MFN, Roscoe MG. *Effectiveness and predictability of treatment with clear orthodontic aligners: A scoping review*. *Int Orthod*. 2023;21(2):100755. doi:10.1016/j.ortho.2023.100755

11. Bouchant M, Saade A, El Helou M. Is maxillary arch expansion with Invisalign® efficient and predictable? A systematic review. *Int Orthod*. 2023;21(2):100750. doi:10.1016/j.ortho.2023.100750
12. Aragon MLSC, Mendes Ribeiro SM, Fernandes Fagundes NC, Normando D. Effectiveness of dental arch expansion in the orthodontic treatment with clear aligners: a scoping review. *Eur J Orthod*. 2024;46(6):cjae059. doi:10.1093/ejo/cjae059
13. Rocha AS, Gonçalves M, Oliveira AC, Azevedo RMS, Pinho T. Efficiency and Predictability of Coronal Maxillary Expansion Repercussion with the Aligners System: A Retrospective Study. *Dent J (Basel)*. 2023;11(11):258. Published 2023 Nov 6. doi:10.3390/dj11110258
14. Galluccio G, De Stefano AA, Horodyski M, et al. Efficacy and Accuracy of Maxillary Arch Expansion with Clear Aligner Treatment. *Int J Environ Res Public Health*. 2023;20(5):4634. Published 2023 Mar 6. doi:10.3390/ijerph20054634
15. Vidal-Bernárdez ML, Vilches-Arenas Á, Sonnemberg B, Solano-Reina E, Solano-Mendoza B. Efficacy and predictability of maxillary and mandibular expansion with the Invisalign® system. *J Clin Exp Dent*. 2021;13(7):e669-e677. Published 2021 Jul 1. doi:10.4317/jced.58315
16. Lázaro-Abdulkarim A, Hernández-Alfaro F, Puigdollers-Pérez A, Giralt-Hernando M, Elnayef B, Valls-Ontañón A. Is efficacy of miniscrew-assisted rapid palatal expansion in mid to late adolescents and young adults related to craniofacial sutures opening? A systematic review and meta-analysis. *Med Oral Patol Oral Cir Bucal*. 2025;30(2):e271-e281. Published 2025 Mar 1. doi:10.4317/medoral.26935
17. Li N, Wang C, Yang M, et al. Effects of different tooth movement patterns and aligner thicknesses on maxillary arch expansion with clear aligners: a three-dimensional finite element study. *Front Bioeng Biotechnol*. 2024;12:1424319. Published 2024 Jun 25. doi:10.3389/fbioe.2024.1424319
18. Yao S, Jiang W, Wang C, He Y, Wang C, Huang L. Improvements of tooth movement efficiency and torque control in expanding the arch with clear aligners: a finite element analysis. *Front Bioeng Biotechnol*. 2023;11:1120535. Published 2023 Jun 1. doi:10.3389/fbioe.2023.1120535
19. Bruni A, Ferrillo M, Gallo V, et al. Efficacy of clear aligners vs rapid palatal expanders on palatal volume and surface area in mixed dentition patients: A randomized controlled trial. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2024;166(3):203-214. doi:10.1016/j.ajodo.2024.04.006

20. de-la-Rosa-Gay C, Valmaseda-Castellón E, Figueiredo R, Camps-Font O. Factors affecting expansion predictability of clear aligner treatment. *Clin Oral Investig.* 2025;29(5):257. Published 2025 Apr 21. doi:10.1007/s00784-025-06328-y
21. Bruni A, Gallo V, Parrini S, et al. Predictability of maxillary dentoalveolar expansion with clear aligners in patients with mixed dentition. *Korean J Orthod.* 2025;55(2):85-94. doi:10.4041/kjod24.082
22. Zhou N, Guo J. Efficiency of upper arch expansion with the Invisalign system. *Angle Orthod.* 2020;90(1):23-30. doi:10.2319/022719-151.1
23. Macrì M, Medori S, Festa F. Evaluation of Maxillary Dentoalveolar Expansion with Clear Aligners: A Retrospective CBCT Study. *Diagnostics (Basel).* 2025;15(13):1586. Published 2025 Jun 23. doi:10.3390/diagnostics15131586
24. Mao B, Tian Y, Li J, Zhou Y. Expansion rebound deformation of clear aligners and its biomechanical influence: a three-dimensional morphologic analysis and finite element analysis study. *Angle Orthod.* 2023;93(5):572-579. doi:10.2319/102622-734.1
25. Houle JP, Piedade L, Todescan R Jr, Pinheiro FH. The predictability of transverse changes with Invisalign. *Angle Orthod.* 2017;87(1):19-24. doi:10.2319/122115-875.1
26. Kravitz ND, Kusnoto B, BeGole E, Obrez A, Agran B. How well does Invisalign work? A prospective clinical study evaluating the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2009;135(1):27-35. doi:10.1016/j.ajodo.2007.05.018
27. Haouili N, Kravitz ND, Vaid NR, Ferguson DJ, Makki L. Has Invisalign improved? A prospective follow-up study on the efficacy of tooth movement with Invisalign. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2020;158(3):420-425. doi:10.1016/j.ajodo.2019.12.015
28. Tien R, Patel V, Chen T, et al. The predictability of expansion with Invisalign: A retrospective cohort study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2023;163(1):47-53. doi:10.1016/j.ajodo.2021.07.032
29. Shahabuddin N, Kang J, Jeon HH. Predictability of the deep overbite correction using clear aligners. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2023;163(6):793-801. doi:10.1016/j.ajodo.2022.07.019
30. Goh S, Dreyer C, Weir T. The predictability of the mandibular curve of Wilson, buccolingual crown inclination, and transverse expansion expression with Invisalign treatment. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2023;163(1):109-116. doi:10.1016/j.ajodo.2021.09.020

31. Morales-Burruezo I, Gandía-Franco JL, Cobo J, Vela-Hernández A, Bellot-Arcís C. Arch expansion with the Invisalign system: Efficacy and predictability. *PLoS One*. 2020;15(12):e0242979. Published 2020 Dec 10. doi:10.1371/journal.pone.0242979
32. Papageorgiou SN, Koletsi D, Iliadi A, Peltomaki T, Eliades T. Treatment outcome with orthodontic aligners and fixed appliances: a systematic review with meta-analyses. *Eur J Orthod*. 2020;42(3):331-343. doi:10.1093/ejo/cjz094
33. Lione R, Paoloni V, Bartolommei L, et al. Maxillary arch development with Invisalign system. *Angle Orthod*. 2021;91(4):433-440. doi:10.2319/080520-687.1
34. Loberto S, Pavoni C, Fanelli S, Lugli L, Cozza P, Lione R. Predictability of expansion movements performed by clear aligners in mixed dentition in both arches: a retrospective study on digital casts. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):694. Published 2024 Jun 15. doi:10.1186/s12903-024-04435-y
35. Papadimitriou A, Mousouleas S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Prog Orthod*. 2018;19(1):37. Published 2018 Sep 28. doi:10.1186/s40510-018-0235-z
36. Inchingolo AM, Ceci S, Coloccia G, et al. Predictability and Effectiveness of Nuvola® Aligners in Dentoalveolar Transverse Changes: A Retrospective Study. *Biomedicine*. 2023;11(5):1366. Published 2023 May 5. doi:10.3390/biomedicine11051366
37. Karşlı, N., Ocak, I., Akyıldız, M. et al. Evaluation of the effect of different attachment configurations on molar teeth in maxillary expansion with clear aligners – a finite element analysis. *BMC Oral Health* 24, 921 (2024). doi.org/10.1186/s12903-024-04544-8
38. Zhang Y, Hui S, Gui L, Jin F. Effects of upper arch expansion using clear aligners on different stride and torque: a three-dimensional finite element analysis. *BMC Oral Health*. 2023;23(1):891. Published 2023 Nov 20. doi:10.1186/s12903-023-03655-y
39. Chen J, Zhu D, Zhao M, Cheng Z, Pan Y, Liu X. Three-dimensional finite element analysis of the optimal mechanical design for maximum inward movement of the anterior teeth with clear aligners. *Sci Rep*. 2024;14(1):13203. Published 2024 Jun 8. doi:10.1038/s41598-024-63907-x
40. Kim K, Choi YK, Kim SH, Kim SS, Kim YI. Multi-step finite element simulation for clear aligner space closure: a proof-of-concept compensation protocol. *Sci Rep*. 2025;15(1):22220. Published 2025 Jul 1. doi:10.1038/s41598-025-07110-6
41. Robertson L, Kaur H, Fagundes NCF, Romanyk D, Major P, Flores Mir C. Effectiveness of clear aligner therapy for orthodontic treatment: A systematic review. *Orthod Craniofac Res*. 2020;23(2):133-142. doi:10.1111/ocr.12353

42. Putrino A, Barbato E, Galluccio G. Clear Aligners: Between Evolution and Efficiency-A Scoping Review. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(6):2870. Published 2021 Mar 11. doi:10.3390/ijerph18062870
43. Charalampakis O, Iliadi A, Ueno H, Oliver DR, Kim KB. Accuracy of clear aligners: A retrospective study of patients who needed refinement. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2018;154(1):47-54. doi:10.1016/j.ajodo.2017.11.028
44. Ghislanzoni LH, Kalemaj Z, Manuelli M, Magni C, Polimeni A, Lucchese A. How well does Invisalign ClinCheck predict actual results: A prospective study. *Orthod Craniofac Res*. 2024;27(3):465-473. doi:10.1111/ocr.12752
45. Simon, M., Keilig, L., Schwarze, J. et al. Treatment outcome and efficacy of an aligner technique – regarding incisor torque, premolar derotation and molar distalization. *BMC Oral Health* 14, 68 (2014). doi.org/10.1186/1472-6831-14-68
46. Koletsi D, Iliadi A, Eliades T. Predictability of rotational tooth movement with orthodontic aligners comparing software-based and achieved data: A systematic review and meta-analysis of observational studies. *J Orthod*. 2021;48(3):277-287. doi:10.1177/14653125211027266
47. Al-Balaa M, Li H, Ma Mohamed A, et al. Predicted and actual outcome of anterior intrusion with Invisalign assessed with cone-beam computed tomography. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2021;159(3):e275-e280. doi:10.1016/j.ajodo.2020.10.018
48. Krieger E, Seiferth J, Marinello I, et al. Invisalign® treatment in the anterior region: were the predicted tooth movements achieved?. *J Orofac Orthop*. 2012;73(5):365-376. doi:10.1007/s00056-012-0097-9
49. Grünheid T, Loh C, Larson BE. How accurate is Invisalign in nonextraction cases? Are predicted tooth positions achieved?. *Angle Orthod*. 2017;87(6):809-815. doi:10.2319/022717-147.1
50. Jiang T, Jiang YN, Chu FT, Lu PJ, Tang GH. A cone-beam computed tomographic study evaluating the efficacy of incisor movement with clear aligners: Assessment of incisor pure tipping, controlled tipping, translation, and torque. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2021;159(5):635-643. doi:10.1016/j.ajodo.2019.11.025
51. Tepedino M, Paoloni V, Cozza P, Chimenti C. Movement of anterior teeth using clear aligners: a three-dimensional, retrospective evaluation. *Prog Orthod*. 2018;19(1):9. Published 2018 Apr 2. doi:10.1186/s40510-018-0207-3

52. Fiori A, Minervini G, Nucci L, d'Apuzzo F, Perillo L, Grassia V. Predictability of crowding resolution in clear aligner treatment. *Prog Orthod.* 2022;23(1):43. Published 2022 Nov 28. doi:10.1186/s40510-022-00438-z
53. Levrini L, Carganico A, Abbate L. Maxillary expansion with clear aligners in the mixed dentition: A preliminary study with Invisalign® First system. *Eur J Paediatr Dent.* 2021;22(2):125-128. doi:10.23804/ejpd.2021.22.02.7
54. Alvarado-Lorenzo A, Antonio-Zancajo L, Curto A, Garcovich D, Criado-Pérez L. Reproducibility and reliability of dental arch measurements: comparing of manual, digital, and app-based methods. *BMC Oral Health.* 2024;24(1):1568. Published 2024 Dec 30. doi:10.1186/s12903-024-05392-2
55. Pouliezou I, Gravia AP, Vasoglou M. Digital Model in Orthodontics: Is It Really Necessary for Every Treatment Procedure? A Scoping Review. *Oral.* 2024; 4(2):243-262. doi.org/10.3390/oral4020020
56. Pamukçu H, Özsoy S, Aksoy PC, Polat Özsoy Ö. Evaluation of maxillary dimensional changes in the mixed dentition: clear aligners vs acrylic expanders. *Angle Orthod.* 2024;94(4):392-399. doi:10.2319/121523-833.1
57. Kurnaz M, Dayan E. Comparison of the effects of maxillary expansion applying rapid maxillary expanders or clear aligners in mixed dentition : A 3D finite element study. *Vergleich der Auswirkungen einer maxillären Expansion im Wechselgebiss mit schnellen Gaumennahterweiterungsgeräten oder mit Alignern : Eine 3D-Finite-Elemente-Studie.* *J Orofac Orthop.* Published online May 9, 2025. doi:10.1007/s00056-025-00590-1
58. Caruso S, Nota A, Tonelli C, et al. Efficacy and Predictability of Maxillary and Mandibular Dental Arch Expansion with Clear Aligners in Prepuberal Subjects: A Digital Retrospective Analysis. *Healthcare (Basel).* 2025;13(13):1508. Published 2025 Jun 24. doi:10.3390/healthcare13131508
59. Ma S, Wang Y. Clinical outcomes of arch expansion with Invisalign: a systematic review. *BMC Oral Health.* 2023;23(1):587. Published 2023 Aug 24. doi:10.1186/s12903-023-03302-6
60. Wang Y, Long H, Zhao Z, et al. Expert consensus on the clinical strategies for orthodontic treatment with clear aligners. *Int J Oral Sci.* 2025;17(1):19. Published 2025 Mar 13. doi:10.1038/s41368-025-00350-2
61. García-Marín C, Otero-Pregigueiro A, Iglesias-Linares A. Predictability of mesiodistal movement of upper and lower molars with clear aligners: a systematic review. *The Angle Orthodontist.* 2025;95(5):563–571. doi: 10.2319/063024-507.1

62. Papadimitriou A, Mousoulea S, Gkantidis N, Kloukos D. Clinical effectiveness of Invisalign® orthodontic treatment: a systematic review. *Prog Orthod.* 2018;19(1):37. Published 2018 Sep 28. doi:10.1186/s40510-018-0235-z
63. Lombardo L, Martini M, Cervinara F, Spedicato GA, Oliverio T, Siciliani G. Comparative SEM analysis of nine F22 aligner cleaning strategies. *Prog Orthod.* 2017;18(1):26. doi:10.1186/s40510-017-0178-9
64. Angelieri F, Cevidanes LH, Franchi L, Gonçalves JR, Benavides E, McNamara JA Jr. Midpalatal suture maturation: classification method for individual assessment before rapid maxillary expansion. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013;144(5):759-769. doi:10.1016/j.ajodo.2013.04.022

X – ANEXOS

X - ANEXOS



COMITÉ DE ÉTICA DE LA UCAM

DATOS DEL PROYECTO

Título:	"Comprobación de la predictibilidad del movimiento con alineadores"	
Investigador Principal	Nombre	Correo-e
Dr.	José Manuel Granero Marín	jmgranero@ucam.edu

INFORME DEL COMITÉ

Fecha	31/05/2024	Código	CE052406
-------	------------	--------	----------

Tipo de Experimentación

Investigación experimental clínica con seres humanos	
Investigación experimental no clínica con seres humanos	
Utilización de tejidos humanos procedentes de pacientes, personas sanas, tejidos embrionarios o fetales	
Utilización de tejidos humanos, tejidos embrionarios o fetales procedentes de bancos de muestras o tejidos	
Investigación observacional, psicológica o comportamental en humanos	
Uso de datos personales, información genética, etc.	X
Experimentación animal	
Utilización de agentes biológicos de riesgo para la salud humana, animal o las plantas	
Uso de organismos modificados genéticamente (OMGs)	

Comentarios Respecto al Tipo de Experimentación

Nada Obsta

Comentarios Respecto a la Metodología de Experimentación

Nada Obsta





COMITÉ DE ÉTICA DE LA UCAM

Sugerencias al Investigador

A la vista de la solicitud de informe adjunto por el Investigador y de las recomendaciones anteriormente expuestas el dictamen del Comité es:

Emitir Informe Favorable	☒
Emitir Informe Desfavorable	☐
Emitir Informe Favorable condicionado a Subsanación	☐
MOTIVACIÓN	
Incrementará conocimientos en su área	

Vº Bº El Presidente,

Fdo.: José Alberto Cánovas Sánchez

El Secretario,



Fdo.: José Alarcón Teruel

