

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

**MODELO COMPUTACIONAL DE LA RESPUESTA BIOMECÁNICA DEL
LIGAMENTO PERIODONTAL DURANTE UN PROCEDIMIENTO DE
EXPANSIÓN RÁPIDA DEL MAXILAR.**

**JOSE ANDRES SIERRA QUIÑONES
BRAYAN FELIPE PINZÓN GARZÓN**

**UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA, D.C.
2023**

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

**MODELO COMPUTACIONAL DE LA RESPUESTA BIOMECÁNICA DEL
 LIGAMENTO PERIODONTAL DURANTE UN PROCEDIMIENTO DE
 EXPANSIÓN RÁPIDA DEL MAXILAR.**

JOSE ANDRES SIERRA QUIÑONES
BRAYAN FELIPE PINZÓN GARZÓN

Proyecto de Investigación

PhD. José Alejandro Guerrero Vargas

UNIVERSIDAD ECCI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTA, D.C.
2023

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

RESUMEN

Las maloclusiones son algunas de las enfermedades orales más frecuentes en las personas, provocando diferentes problemas mecánicos como la mala masticación, desgaste temprano de las estructuras óseas, problemas estéticos y, en el peor de los casos, hacerse daño así mismo por la inclinación de los dientes. Uno de los tratamientos implementados para la corrección de maloclusiones transversales (mordida cruzada), es la Expansión Rápida del Maxilar (ERM). Este procedimiento consiste, en aumentar la dimensión transversal del maxilar mediante un dispositivo disyuntor, pero al aplicarse este tratamiento se puede presentar inclinación de los dientes, pérdida de unidades dentarias y problemas periodontales. Por tal motivo, esta investigación tiene como objetivo principal analizar como la ERM afecta al ligamento periodontal (LPD) mediante simulación computacional.

Para esto, se hizo la obtención de los modelos geométricos a partir de una tomografía de una persona libre de patologías. Se realizaron tres ensambles que estaban compuestos por el cráneo, dientes, LPD y tres dispositivos de expansión diferentes. Con los tres modelos obtenidos se procedió con la simulación mediante el método de los elementos finitos. En los análisis se tuvo en cuenta las fuerzas de masticación promedio y el desplazamiento generado por el dispositivo de expansión después de un cuarto de vuelta del tornillo disyuntor. Los resultados evidenciaron que el anclaje dentó-esquelético es el mejor para expandir el maxilar, pero es el que mayores esfuerzos y deformaciones ocasiona en los LPD. Por otro lado, el dispositivo de anclaje dental es el más equilibrado de los tres. Dado lo anterior, este estudio brinda información que permite un mejor entendimiento de la biomecánica oral y puede usarse como base en investigaciones donde se busque estudiar el LPD durante este tipo de procedimientos.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

ABSTRACT

Malocclusions are some of the most common oral diseases in people, causing different mechanical problems such as poor chewing, early wear of bone structures, aesthetic issues, and, in the worst cases, self-inflicted harm due to tooth misalignment. One of the treatments implemented for correcting transverse malocclusions (crossbite) is Rapid Maxillary Expansion (RME). This procedure involves increasing the transverse dimension of the maxilla using a palatal expander device. However, when this treatment is applied, tooth tipping, loss of dental units, and periodontal problems can occur. Therefore, the main objective of this research is to analyze how RME affects the periodontal ligament (PDL) through computational simulation.

To achieve this, geometric models were obtained from a pathology-free individual's tomography. Three assemblies were created, composed of the skull, teeth, PDL, and three different expansion devices. The finite element method was used to simulate the three models. The analyses took into account the average chewing forces and the displacement generated by the expansion device after a quarter turn of the expander screw. The results showed that dentoskeletal anchorage is the most effective for maxillary expansion but causes greater stresses and deformations in the PDL. On the other hand, the dental anchorage device is the most balanced of the three. Therefore, this study provides information that improves the understanding of oral biomechanics and can serve as a basis for research studying the PDL during this type of procedure.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	10
1.1.	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.1.1.	OBJETIVO GENERAL	14
1.1.2.	OBJETIVO ESPECIFICO	14
1.2.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO	14
2.	MARCO CONCEPTUAL	16
2.1.	BIOMECÁNICA	16
2.2.	CAVIDAD BUCAL	16
2.2.1.	HUESO MANDIBULAR O MAXILAR INFERIOR	16
2.2.2.	HUESO MAXILAR SUPERIOR	17
2.2.3.	HUESO NASAL	17
2.2.4.	HUESO LAGRIMAL	18
2.2.5.	HUESO VÓMER	18
2.2.6.	HUESOS PALATINOS	18
2.3.	PERIODONTO	18
2.3.1.	HUESO ALVEOLAR	18
2.3.1.	CEMENTO RADICULAR	19
2.3.2.	LIGAMENTO PERIODONTAL	19
2.4.	TIPOS DE MALOCLUSIONES	20
2.4.1.	MALOCLUSIÓN VERTICAL	21
2.4.2.	MALOCLUSIÓN SAGITAL	22
2.4.3.	MALOCLUSIÓN TRANSVERSAL	25
2.5.	ERM	26
2.5.1.	DISYUNTOR TIPO HYRAX	27
2.5.2.	DISYUNTOR TIPO HASS	28
2.5.3.	DISYUNTOR TIPO McNAMARA	29
2.6.	ELEMENTOS FINITOS	29
2.7.	ANTECEDENTES	32
3.	METODOLOGÍA	36
3.1.	RECONSTRUCCIÓN DE LA TOMOGRAFIA	36
3.2.	OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA	39
3.3.	MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	42
3.3.1.	MALLADO	42

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

3.3.2.	PROPIEDADES MECÁNICAS.....	45
3.4.	CONDICIONES DE FRONTERA.....	46
3.4.1.	SIMETRIA.....	46
3.4.2.	SOPORTE Y RESTRICCIONES	47
3.4.3.	CONDICIONES DE CARGA	48
4.	RESULTADOS	51
4.1.	EXPANSOR CON ANCLAJE DENTAL.....	51
4.2.	EXPANSOR CON ANCLAJE ESQUELETICO	57
4.3.	EXPANSOR CON VARIACIÓN DEL ANCLAJE DENTAL	63
5.	DISCUSIÓN	69
5.1.	VALIDACIÓN CON LA LITERATURA	69
5.1.1.	VALIDACIÓN DE LOS LIGAMENTOS PERIODONTALES.....	69
5.2.	COMPARACIÓN DEL MODELO	71
5.2.1.	CON MODELO LINEAL	71
5.2.2.	COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES	73
5.2.3.	COMPORTAMIENTO DE LOS TRES MODELOS	76
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO.....	79
7.	BIBLIOGRAFÍA	81

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Huesos del macizo facial	17
Figura 2. Periodonto	19
Figura 3. Maloclusión Vertical.....	21
Figura 4. Tipos de Maloclusiones	23
Figura 5. Maloclusión Clase II	24
Figura 6. Maloclusión clase III	24
Figura 7. Maloclusión transversal.....	25
Figura 8. Primer dispositivo expansor,	26
Figura 9. Proceso de expansión.	27
Figura 10. Disyuntor Tipo Hyrax de 4 bandas.....	28
Figura 11. Disyuntor Tipo Hass	28
Figura 12. Disyuntor Tipo McNamara.....	29
Figura 13. Discretización.....	30
Figura 14. Nodo Lineal.....	31
Figura 15. Nodo bidimensional	31
Figura 16. Nodo Tridimensional.....	32
Figura 17. Obtención de las piezas de estudio en 3D Slicer.....	37
Figura 18. Suavizado de la superficie del cráneo y dientes en 3D Slicer.	38
Figura 19. Obtención de los ligamentos periodontales.....	39
Figura 20. Reducción de caras y vértices en Meshlab.....	39
Figura 21. Verificación de interferencias en la malla del solido en FreeCAD.	40
Figura 22. Dispositivos de expansión diseñados.	41
Figura 23. Corte coronal del cráneo.....	42
Figura 24. Ensamble de todos los elementos	42
Figura 25. Calidad de la malla refinada	44
Figura 26. Simetría.	46
Figura 27. Condiciones de frontera.....	48
Figura 28. Condiciones de frontera, aplicación de los desplazamientos en el dispositivo de expansión.....	49
Figura 29. Condiciones de frontera, aplicación de las fuerzas en el plano oclusal de los dientes.	50
Figura 30. Resultados del cráneo con anclaje dental.	53
Figura 31. Resultados de los dientes con anclaje dental.....	54
Figura 32. Resultados de los LPD con anclaje dental.....	56
Figura 33. Resultados del hyrax con anclaje dental.....	57
Figura 34. Resultados del cráneo con anclaje dentó - esquelético.....	58
Figura 35. Resultados de los dientes con anclaje dentó - esquelético.	60
Figura 36. Resultados de los LPD con anclaje dentó - esquelético	61
Figura 37. Resultados del hyrax con anclaje dentó - esquelético	63
Figura 38. Resultados del cráneo con la variación del anclaje dental	64
Figura 39. Resultados de los dientes con la variación del anclaje dental	66
Figura 40. Resultados de los LPD con la variación del anclaje dental	67
Figura 41. Resultados del hyrax con la variación del anclaje dental.....	68
Figura 42. Validación del esfuerzo equivalente von Mises en el LPD del primer premolar y molar	70

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Figura 43. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con el expansor con anclaje dental 71

Figura 44. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con el expansor con anclaje esquelético 72

Figura 45. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con la variación del expansor con anclaje dental. 72

Figura 46. Comparación de la distribución de la deformación total en el modelo con dispositivo de expansión con anclaje dental..... 74

Figura 47. Comparación de la distribución de la deformación total en los dientes con dispositivo de expansión con anclaje dental..... 75

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cantidad de nodos y elementos de la malla para cada modelo.....	43
Tabla 2. Propiedades mecánicas de los materiales lineales.	45
Tabla 3. Propiedades mecánicas de los LPD.	46

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El sistema masticatorio está compuesto por los dientes, nervios, estructuras de soporte (maxilar, mandíbula y articulaciones temporomandibulares), músculos y del sistema vascular que abastece de sangre a estos tejidos (Fuentes del Campo & Maerín Alvarado, 2021). La masticación es la primera etapa de la digestión e involucra varios procesos motores entre los que se encuentra la ingesta de alimentos, el transporte intraoral, y el principal que es, la formación del bolo alimenticio. Lo anterior se logra por medio de triturar y ablandar la comida en la cavidad bucal, realizando una mezcla con la saliva para luego poder deglutir el alimento (Yamamura, Inoue, & Yamada, 2017). En relación con el movimiento de la boca durante la formación del bolo se pueden establecer tres procesos. El primero es la apertura de la cavidad oral seguida por un movimiento libre del maxilar, el segundo es la secuencia de abrir y cerrar la mandíbula de forma repetitiva; el último es donde termina el proceso de molienda para permitir la ingesta del alimento (Paz Moya, Marquardt, & Olate, 2017).

La relación del arco dental superior e inferior durante el movimiento que efectúa la mandíbula al masticar se denomina oclusión, una mordida ideal se debe caracterizar por tener una relación óptima del cráneo respecto a todos los componentes del aparato masticatorio, además de que ambos cóndilos se muevan en sincronía. Cuando esta relación no se cumple, ya sea por diferencias de tamaño entre el maxilar y la mandíbula o por una desviación entre ellos, empiezan a surgir síntomas que pueden derivar en diferentes patologías como la maloclusión transversal. La mordida cruzada es un tipo de maloclusión transversal, que presenta disminución en la distancia del maxilar en el plano horizontal (transversal) y muestra alteraciones dentó esqueléticas. De acuerdo a la

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Organización Mundial de la Salud [OMS] las patologías que ocupan el tercer lugar de prevalencia dentro de los problemas de salud bucodental son las maloclusiones (García Fernández & García García, 2021). Por otro lado, según la organización Panamericana de la Salud en Latinoamérica hay una incidencia de maloclusiones que supera 80% de la población, siendo el motivo con más consultas en las clínicas ortodónticas (Urrego Burbano, *et. al.* 2011). Para solucionar la maloclusión transversal se utiliza como tratamiento la Expansión Rápida del Maxilar (ERM) (Ardizzone Garcia, Celemin, Sánchez, & Aneiros, 2021).

La expansión rápida del maxilar es un procedimiento ortopédico que emplea un dispositivo mecánico como tratamiento para corregir la dimensión del maxilar. Este mecanismo también conocido como hyrax o expansor de maxilar está compuesto por un tornillo disyuntor y dos brazos que lo conectan con el primer molar y premolar. El tratamiento consiste en activar el mecanismo por medio de giros en el tornillo expansor, el cual le transmite las fuerzas a los elementos de sujeción para luego distribuidas en los demás componentes de la cavidad bucal (Florez, Gallegos, & Fierro, 2020). Este es un procedimiento ideal para los pacientes de temprana edad donde la sutura palatina ósea aún no se ha fusionado, ya que permite expandir el maxilar con tan solo el dispositivo. Por otro lado, si el paciente es un adolescente o adulto donde ya se encuentran puentes óseos en la sutura palatina, se debe realizar una intervención quirúrgica previa. Para este procedimiento, se realiza un pequeño corte en la encía para facilitar la expansión del paladar, luego se coloca el disyuntor para que el paciente poco a poco lo comience a abrir hasta alcanzar la dimensión necesaria, al terminar el tratamiento se mantiene el expansor por un periodo, para que los huesos se fusionen en su nueva posición (Instituto maxilofacial, 2021). Dependiendo del área afectada intervienen diferentes campos de

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

estudio como la odontología, ortodoncia, mecánica, anatomía y biomecánica para obtener datos y resultados concretos (Mercado, *et. al.* 2018).

Actualmente la biomecánica utiliza métodos computacionales en diversas investigaciones para conocer y analizar el comportamiento de los tejidos bucales cuando son sometidos a cargas o esfuerzos (Galicer Sánchez, 2021). Por ejemplo, el método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico utilizado para dar solución a problemas de ingeniería con alto nivel de complejidad, en los cuales no es posible obtener un resultado analítico por medio de expresiones matemáticas. Esto permite resolver modelos que involucran geometrías complejas, cargas distribuidas no uniformes y estimar el efecto que tienen las propiedades de los materiales en los cuerpos (Universidad de las Américas Puebla, 2021). Esta herramienta se ha utilizado en el ámbito investigativo para identificar algunos factores que ocasionan la aparición de trastornos en la cavidad bucal. Además, los datos han aportado información para tener un mejor entendimiento de las afecciones en la boca, ayudando a que se tengan alternativas para tratamientos que mitiguen, solucionen y eviten el desarrollo de patologías (Machado Pérez, 2015).

Algunas investigaciones se centraron en analizar como la expansión rápida de maxilar actúa sobre la sutura medial palatina, el cráneo, los dientes y el dispositivo de expansión, con el fin de conocer como este procedimiento afecta el correcto funcionamiento del sistema estomatognático (Guerrero Vargas, *et. al.* 2019; Shrivastava, *et. al.* 2021). Otros autores acercaron estos análisis más a la realidad, debido a que estudiaron el efecto de la ERM teniendo en cuenta el ligamento periodontal con las propiedades de un material lineal, con el fin de determinar el comportamiento de este tejido ante cargas ortodónticas expansivas (Guzmán Martínez & Aristizabal Mulett, 2020; Trojan Serpe, *et. al.* 2014).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

La revisión de la literatura demuestra que varios autores han analizado el efecto de la expansión rápida de maxilar en el cráneo y demás tejidos; a pesar de esto, en la literatura no hay información concreta sobre el comportamiento del ligamento periodontal como un tejido con propiedades de un material viscoelástico durante la ERM (Guerrero Vargas, *et. al.* 2019; Trojan Serpe, *et. al.* 2014; Guzmán Martínez & Aristizábal Mulett, 2020). Este es un tejido importante de la zona bucal, ya que se encarga de unir la raíz del diente al hueso alveolar, además de ayudar a soportar y distribuir las cargas generadas en las piezas dentarias (Delgado, *et. al.* 2019). Por tal motivo, esta investigación se centra en conocer el impacto ocasionado por la expansión rápida de maxilar en el ligamento periodontal con características de un tejido viscoelástico en una persona adulta sin patologías aparentes por medio del método de los elementos finitos. Para lograr este objetivo, se realizó un modelo tridimensional del cráneo, dientes y ligamentos basado en una tomografía computarizada (TC) de una persona adulta. Los parámetros y condiciones de frontera que se utilizaron se tomaron de las revisiones bibliográficas consultadas que más se asemejaban al objetivo del estudio realizado. Para validar que los datos obtenidos en esta investigación concordaban con lo reportado por otros estudios, se compararon los valores, la distribución de las deformaciones con información de la literatura, donde se evalúa el comportamiento de la estructura cráneo maxilar durante una ERM.

Esta investigación suministrara información que permite conocer cómo la ERM afecta a los ligamentos, dientes y cráneo. Con estos datos se busca aportar a entender cómo este tratamiento afecta la zona bucal y, con ello, brindar información a futuras investigaciones donde se estudie el efecto de la expansión rápida de maxilar en los ligamentos periodontales.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

1.1.OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la respuesta biomecánica del ligamento periodontal durante un procedimiento de expansión rápida del maxilar mediante simulación computacional.

1.1.2. OBJETIVO ESPECIFICO

- Realizar la reconstrucción tomográfica del maxilar que permita obtener el modelo CAD para la simulación computacional.
- Desarrollar una simulación computacional que permita imitar una activación del procedimiento de expansión rápida del maxilar, usando tres dispositivos de expansión convencionales.
- Evaluar el comportamiento mecánico del ligamento periodontal en las unidades dentales superiores al realizar una activación del dispositivo expensor.

1.2. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO

En la primera sección de este trabajo se encuentra la introducción, la cual está compuesta por el desarrollo conceptual del tema de investigación y por los objetivos planteados. En el capítulo dos, se describen los tejidos óseos que componen al maxilar, así como las estructuras que hacen parte del periodonto, luego se presentan los diferentes tipos de maloclusión y, por último, se explica el procedimiento de la ERM y los dispositivos de expansión utilizados. En la tercera sección del trabajo se describe la metodología utilizada para la obtención de los modelos CAD, además se explica el proceso de optimización de los ensambles y finalmente se habla de las condiciones de frontera usadas para la simulación computacional.

En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los tejidos involucrados durante la expansión rápida de maxilar para los modelos desarrollados. En

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

la quinta sección se encuentra la discusión de los resultados por medio de comparaciones y validaciones con investigaciones de otros autores; además, se analiza el comportamiento del ligamento periodontal en cada uno de los disyuntores modelados. Finalmente, en la última parte se construyen las conclusiones de esta investigación y se plantean los posibles trabajos a futuro.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 2

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1. BIOMECÁNICA

La biomecánica es la disciplina que aplica las leyes de la mecánica en el movimiento biológico para el estudio de fuerzas y desplazamientos generados en los ligamentos, músculos y huesos cuando un ser vivo realiza una acción. En el análisis de estos fenómenos intervienen varias ramas de estudio como la medicina, anatomía e ingeniería, las cuales se encargan de examinar y definir qué tejidos hacen parte del movimiento y cómo es posible que realice una acción el objeto investigado. Este análisis se puede realizar de forma cuantitativa y cualitativa, con el primer método se obtienen datos tangibles como mediciones, gráficos, etc. y con el segundo se adquiere información por medio de cualidades, observaciones y experticia (NFPT CEC, 2010).

2.2. CAVIDAD BUCAL

2.2.1. HUESO MANDIBULAR O MAXILAR INFERIOR

El maxilar inferior (Figura 1A) o mandíbula, es el hueso más denso y prominente de la cara, con orificios donde nacen las raíces dentarias, es simétrico y tiene forma de herradura, presentando un reborde superior alveolar. Este articula en el hueso temporal, formando la articulación temporomandibular, gracias a que la mandíbula sirve como punto de enganche, para que los músculos encargados de mover la mandíbula lo hagan y se genere la acción de masticar (Anatomía Topografica, 2021).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

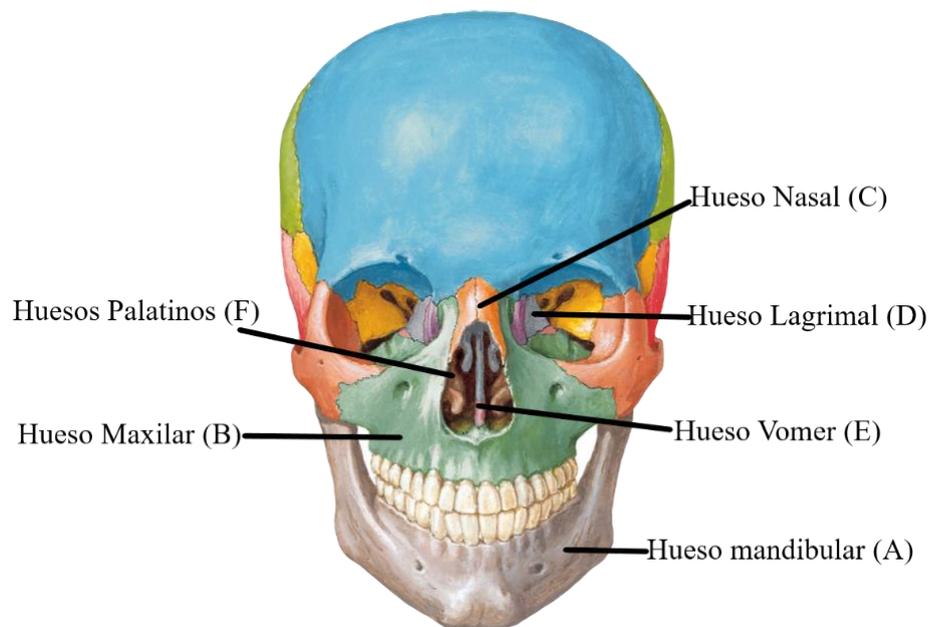


Figura 1. Huesos del macizo facial Adaptado de (Naranjo, 2021, pág. 3).

2.2.2. HUESO MAXILAR SUPERIOR

El hueso maxilar superior (Figura 1B) tiene forma de pirámide, esta parte está implicada en la formación de nariz, orbita ocular, paladar, ubicación de los dientes superiores y tiene un papel importante en la masticación y alimentación como parte fija del proceso. El maxilar superior se conforma de un cuerpo y cuatro proyecciones (proceso frontal, apófisis de cigomático, apófisis palatina, proceso alveolar) cada una con diferentes características y funciones (Anatomía Topografica, 2021).

2.2.3. HUESO NASAL

Los huesos nasales (Figura 1C) o también llamados huesos propios de la nariz, son dos estructuras óseas simétricas pequeñas que forman el puente de la nariz, según la anatomía, este cuenta con cara posterior y anterior. Se ubican en la parte media de la cara, son los responsables del desarrollo adecuado de la nariz ya que son las estructuras donde se empalman los cartílagos nasales (Fisioline, 2015).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

2.2.4. HUESO LAGRIMAL

El hueso lagrimal (Figura 1D) también llamado unguis, es el hueso de menor tamaño en la cara y es una laminilla ósea rectangular que varía desde ser transparente hasta ser un hueso duro (Espuch Núñez, Alañon Fernandez, & Alañon Fernandez, 2021). Está compuesto por una fina capa de hueso cortical lamelar. Se encuentra ubicado cerca de los huesos nasales. Este se articula por delante con la apófisis del maxilar, por detrás con la lámina papirácea del etmoides; por arriba con el hueso frontal y por debajo con el comete inferior (Gómez de las Heras & Rodríguez Gómez, 2021)..

2.2.5. HUESO VÓMER

El hueso vómer (Figura 1E) forma parte del tabique de las fosas nasales y su función es apoyarlo, tiene una forma de lámina cuadrilátera muy delgada y transparente, une la base del cráneo con la maxila y se extiende desde la cara inferior del cuerpo del esfenoides hasta la sutura medial palatina (Palomares Morales & Meneses Gomez, 2021).

2.2.6. HUESOS PALATINOS

Los huesos palatinos (Figura 1F) son huesos pares ubicados en la parte posterior de las fosas nasales, que a su vez forman cierta porción de la pared lateral del paladar óseo y del fondo de la cavidad orbitaria (Albisu Andrade, 2015). Son cortos y compactos, tienen forma de L con una lámina horizontal y otra perpendicular (Infante Contreras, 2009).

2.3. PERIODONTO

2.3.1. HUESO ALVEOLAR

El hueso alveolar forma parte del maxilar superior e inferior, es la porción oral donde los dientes erupcionan. El proceso alveolar está conformado por el hueso de soporte y el alveolar, el primero actúa como soporte dentario y está compuesto por placas corticales y

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

trabeculares y el segundo es una lámina delgada de hueso que rodea las raíces de los dientes (Odont Moder, 2012).

2.3.1. CEMENTO RADICULAR

El cemento radicular, es un tejido conectivo calcificado no vascularizado, que se encarga de cubrir las superficies radiculares de los órganos dentarios y su función principal es la de anclar las fibras del ligamento periodontal a la raíz del diente (Gutiérrez Venegas, 2004). Está compuesto por elementos celulares, cementoblastos, cementocitos y una matriz extracelular calcificada que contienen un 46% de matriz inorgánica, 22% de materia orgánica y 32% de agua, a su vez existen dos tipos de cemento, el acelular y celular (Regalado Ruiz & Andrés del Ángel, 2005).

2.3.2. LIGAMENTO PERIODONTAL

El ligamento periodontal (Figura 2) es una delgada capa de tejido conectivo fibroso que se encarga de unir los dientes al hueso alveolar que lo aloja, posee un alto contenido vascular y celular. Sus principales funciones son la de mantener los elementos dentarios en el alveolo, soportar y resistir las fuerzas de masticación, además cuenta con mecanorreceptores neurológicos que controlan la masticación (Gómez de Derraris & Campos Muñoz, 2009; Llerena, 2021).

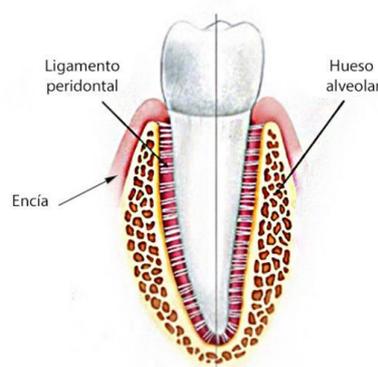


Figura 2. Periodonto tomado de (Fábregues , 2021, pág. 1).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

El ligamento está compuesto por células, fibras, y sustancia fundamental amorfa, también cuenta con vasos sanguíneos y nervios. Como fibra principal está el colágeno que se encargan de unir el hueso y el cemento radicular (Garcia Ballesta, Pérez Lajarín , & Cortés Lillo, 2017). El ancho de este tejido varía entre un individuo y otro, pero en general el espesor comúnmente esta entre 0.10 y 0.38 mm, el tamaño disminuye con la edad adulta y aumenta con la función masticatoria. El ligamento periodontal tiene diferentes funciones, entre estas se encuentra la protectora, la formadora y la nutritiva. La función protectora se encarga de cuidar las unidades dentarias ante excesos de fuerzas oclusales y de desplazamiento, la formadora tiene la función de formar y reparar el hueso alveolar y el cemento radicular; por último, la nutritiva, se responsabiliza de la irrigación de sangre a todos los componentes que conforman este tejido (Llerena, 2021).

2.4.TIPOS DE MALOCLUSIONES

La alineación correcta de la dentadura en la mordida se define como oclusión, es cuando los dientes tienen las dimensiones apropiadas, espaciado adecuado y se encuentran rectos, pero la oclusión se puede ver afectada por el estado de los tejidos duros y blandos que rodean a los dientes. Si algunas de las características nombradas presentan anomalías, como, por ejemplo: superposición de dientes, diferencia de tamaño en los maxilares o que las piezas dentales superiores no encajen de manera correcta con las inferiores, se puede decir que el paciente presenta algún tipo de maloclusión (Dentum, 2021).

La maloclusión no solo afecta la estética del individuo, sino que perjudica el bienestar de los dientes y la buena fonación. En muchos de los acontecimientos de maloclusión, las personas notan que su mordida no es la correcta, que afecta el proceso de masticación y además se puede presentar dolor en algún diente o la encía. Para dar un diagnóstico de

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

esta patología, es necesario que un especialista en ortodoncia evalúe y realice una valoración detallada de la cavidad oral, junto con la revisión de las estructuras y movimientos bucales, con el fin de determinar el procedimiento de corrección más adecuado para el paciente (Mercado & Mamali, 2018).

Las causas de la maloclusión son multifactoriales y dependen del tipo de maloclusión del paciente, pero en la etiología se dividen en dos componentes principales, los aspectos genéticos y los factores exógenos o ambientales. Los tipos de maloclusiones presentadas en las personas se pueden clasificar en tres planos espaciales: vertical, sagital (anteroposterior) y transversal (Universidad Nacional de Colombia, 2016)

2.4.1. MALOCLUSIÓN VERTICAL

La maloclusión vertical se puede observar como la falta de contacto entre las estructuras dentarias superiores e inferiores, se evidencia mayor afectación en la zona de los dientes incisivos y anterosuperiores-inferiores (Figura 3). Este tipo de maloclusión puede afectar las estructuras dentoalveolares y/o esqueléticas de la boca (Veira, 2019).



Figura 3. Maloclusión Vertical. Tomado de (Gonzalez, 2018, pág. 1)

La maloclusión vertical dentoalveolar no presenta alteraciones esqueléticas en los maxilares, este ocasionalmente se produce por hábitos como el empuje lingual donde el niño, al tragar empuja la lengua contra los dientes frontales o también puede ser por el

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

hábito de introducir el pulgar en la cavidad bucal. La maloclusión vertical esquelética es ocasionada directamente por la geometría y por un crecimiento maxilo-mandibular anormal. Los tipos de alteraciones verticales dentoalveolares son: la mordida abierta dentoalveolar con patrón de crecimiento vertical u horizontal, sobre mordida, mordida borde a borde y mordida profunda dentoalveolar (Morales, 2005).

Una forma de dividir los tipos de maloclusiones verticales es por medio de las características faciales, la cuales son: la maloclusión vertical esquelética, síndrome de cara corta o mordida profunda esquelética y síndrome de cara larga o mordida abierta esquelética (Veira, 2019).

2.4.2. MALOCLUSIÓN SAGITAL

La maloclusión sagital relaciona el sentido anteroposterior con la posición de los molares permanentes y se clasifican en tres tipos: oclusión clase I, maloclusión clase II y maloclusión clase III.

2.4.2.1 OCLUSIÓN CLASE I

Esta se considera como una mordida normal, que presenta los molares inferiores ligeramente adelantados a los superiores, mientras los caninos superiores se encuentran atrás de los caninos inferiores como se presenta en la Figura 4A. En el contexto oclusal el término “normal” se entiende como un patrón de referencia óptimo teniendo los 28 dientes alineados en el arco superior, donde se logra cumplir adecuadamente funciones masticatorias, preservando la integridad dental y la armonía con el aparato estomatognático (Vasquez, 2003).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

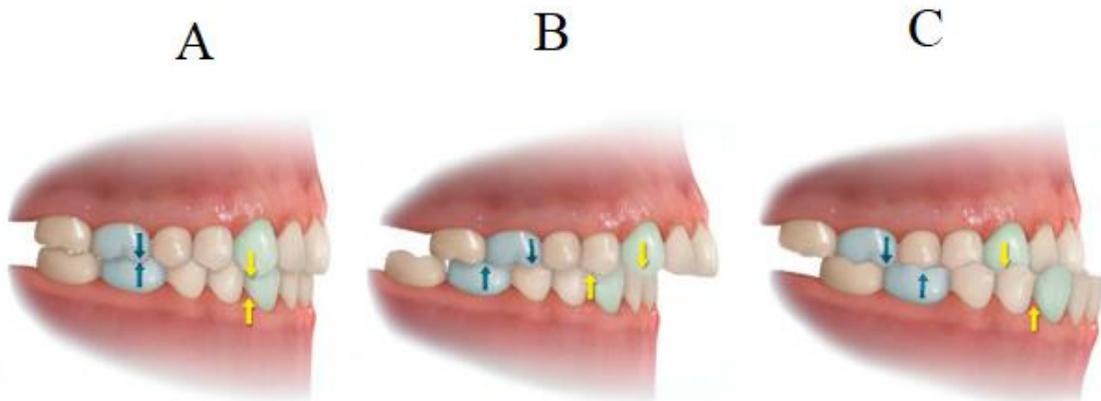


Figura 4. Tipos de Maloclusiones A) Oclusión clase I, B) Maloclusión clase II, C) Maloclusión clase III. Tomado de (Gram dent, 2017, pág. 1)

2.4.2.2 MALOCLUSIÓN CLASE II

Los individuos con maloclusión clase II tienen prognatismo maxilar y/o retrognatismo mandibular, como se observa en la Figura 4B, algunos casos puede traer alteraciones dentales. Estas se clasifican en 2 divisiones: la división 1 cuenta con los incisivos superiores inclinados hacia adelante, generando un aumento en la mordida y una mala situación estética para el paciente, como se muestra en la Figura 5A. La segunda división se caracteriza por tener una inclinación lingual muy pronunciada de los dientes centrales, la mordida es profunda y el alcance horizontal es mínimo, como se evidencia en la Figura 5B. Cuando los casos presentan una excesiva inclinación, las encías y tejidos se pueden ver afectados, por los bordes de los incisivos generando lesiones (Universidad Nacional de Colombia, 2016).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009



Figura 5. Maloclusión Clase II A) División 1 B) División 2. Tomado de (Universidad Nacional de Colombia, 2016, pág. 9)

2.4.2.3 MALOCLUSIÓN CLASE III

Esta es una de las afectaciones más complejas y menos frecuentes en la población, presentándose en solo el 5%, también se le denomina prognatismo y afecta el libre desarrollo de la mandíbula, generando complicaciones en la mordida y estética del individuo. Se presentan dos tipos de maloclusión III: la dentaria que se identifica porque la mandíbula se encuentra adelantada con respecto al maxilar superior (Gualán Caruche, Sigüencia Cruz, & Bravo Calderón, 2015). La esquelética, se caracteriza por tener la mandíbula grande o un maxilar pequeño, además, en ciertos casos se puede presentar ambas situaciones, como en la Figura 6 (Bratos, Ferrus & Bratos, 2019).



Figura 6. Maloclusión clase III. Tomado de (Bratos, Ferrus & Bratos, 2019)

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

2.4.3. MALOCLUSIÓN TRANSVERSAL

La maloclusión transversal cuenta con alteraciones en el plano horizontal (transversal), donde las cúspides palatinas de los premolares y molares superiores e inferiores no encajan de manera correcta, además la anchura de los maxilares y la inclinación de los dientes también presentan anomalías. Los planos sagitales y verticales son totalmente independientes al plano horizontal, por consiguiente, se dividen en dos tipos de anomalías transversales, la mordida en tijera y la mordida cruzada posterior (Mata, *et. al.* 2007).

La mordida en tijera es una anomalía generada por la anchura de los maxilares, donde la cúspide de los molares superiores se encuentra por fuera de los molares inferiores, como se ve en la Figura 7C, o cuando las caras palatinas de los premolares superiores se encuentren en contacto con la cara vestibular de los dientes inferiores (Veira, 2019).

Por otro lado, la mordida cruzada se divide en tres clases, mordida cruzada posterior, mordida cruzada posterior bilateral y mordida cruzada unilateral, sin embargo, la principal característica es que la cara vestibular de los premolares del maxilar se acerca hacia la cara lingual de los dientes de la mandíbula.

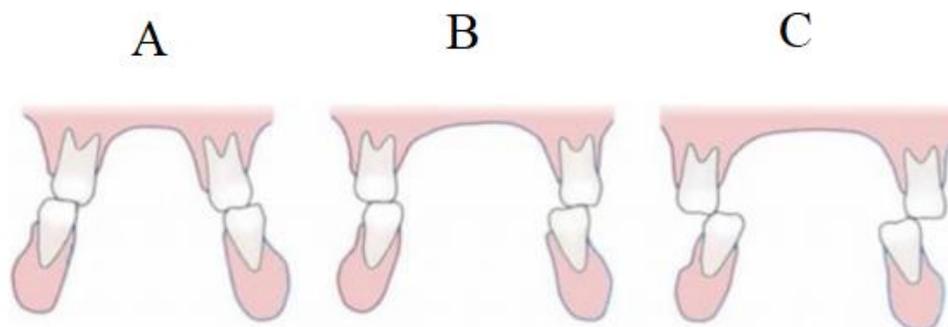


Figura 7. Maloclusión transversal A) mordida cruzada, B) normal y C) mordida en tijera. Tomado de (Bratos, Ferrus & Bratos, 2020, pág. 1)

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

2.5. EXPANSIÓN RÁPIDA DEL MAXILAR

Uno de los tratamientos ortodónticos más eficientes para mejorar la geometría oral es la expansión transversal del maxilar o disyunción rápida palatina, este método propone buscar una relación normal maxilo-mandibular y la alineación con el cráneo. Este procedimiento es recomendable hacerlo en individuos de temprana edad, entre los 4 a 6 años, donde la sutura palatina aún no se ha fusionado, pero de igual manera se puede realizar en pacientes donde su proceso de crecimiento óseo ha finalizado (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012).

La expansión rápida del maxilar o ERM es un procedimiento terapéutico que tiene como objetivo aumentar la distancia transversal entre las piezas orales. Este procedimiento ortopédico fue creado por Emerson C. Angell en el siglo XIX (1860), el tratamiento en su primera versión, aplicó un tornillo expansivo en medio de los premolares, el cual se ampliaba $\frac{1}{4}$ de pulgada (in) cada dos semanas. Al hacer este proceso se observó que se producía una ampliación transversal entre los dientes del sujeto de estudio, el tornillo utilizado se muestra en la Figura 8 (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012).

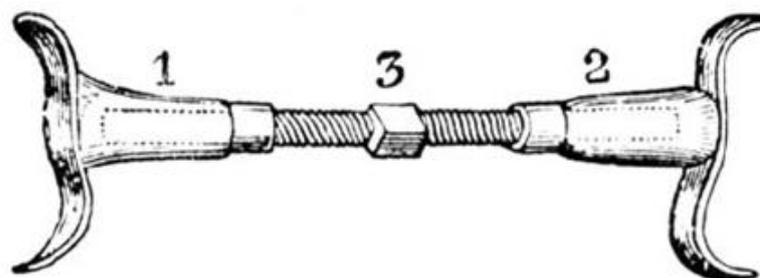


Figura 8. Primer dispositivo expansor, invento de Emerson C. Angell. Tomado de (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012, pág. 1)

Este procedimiento generó muchas polémicas en su época debido a que no se tenía ninguna evidencia de la eficacia del aparato. Fue solo hasta finales de los años 50 que se volvió a utilizar la expansión rápida del maxilar en los Estados Unidos. Debbane y Hass

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

realizaron estudios en animales, uno lo hizo en gatos y el otro en cerdos, al hacer estos procedimientos corroboraron que la sutura medial palatina se abría al utilizar la ERM, demostrando que el tratamiento funcionaba (Florez, Gallegos, & Fierro, 2020). La fuerza que aplica el mecanismo empuja el ligamento periodontal, los dientes de anclaje y las curvas alveolares de manera paulatina, hasta expandir la sutura medial palatina (Figura 9). Los efectos producidos por la ERM en el complejo maxilofacial cumplen su propósito, ya que la bóveda palatina mantiene su altura original, aumenta el ancho de la cavidad nasal, ocasionando un incremento en el flujo del aire y alineando el maxilar y la mandíbula correctamente (Pedrosa, 2008).

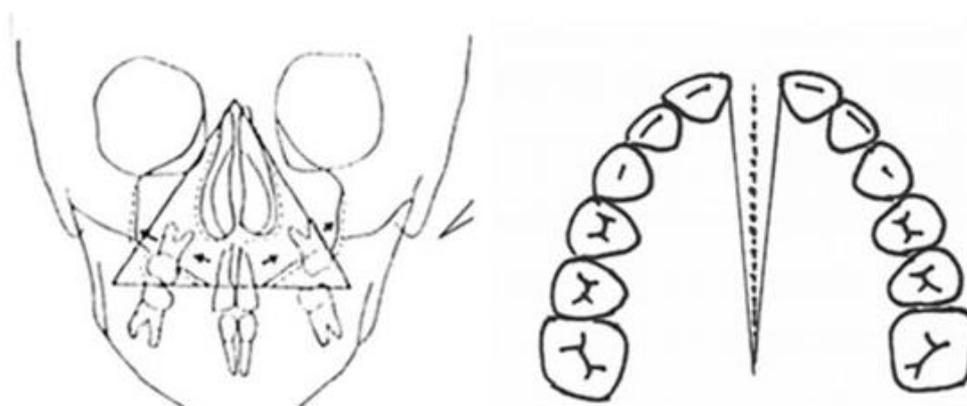


Figura 9. Proceso de expansión. Tomado de (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012, pág. 1)

2.5.1. DISYUNTOR TIPO HYRAX

Los disyuntores tipo hyrax (Figura 10) son aparatos diseñados para aumentar el tamaño del maxilar, cuando este es más pequeño respecto a la mandíbula. La fuerza que genera el dispositivo hyrax sobre el maxilar, ocasiona que se abra la sutura medial palatina, para rellenar este espacio con nuevo hueso. El procedimiento es utilizado en pacientes con mordidas cruzadas posteriores, apiñamientos dentarios, maloclusión Clase II división 1, maloclusión Clase III temprana o en fisuras de labio y paladar. La ERM se debe verificar mediante radiografías oclusales, debido a que la apertura muy rápida del

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

disyuntor en niños pequeños puede provocar daños en la base de la nariz (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012).



Figura 10. Disyuntor Tipo Hyrax de 4 bandas tomado de (Bastidas, Arias, & Quiros, 2012, pág. 1).

El dispositivo mostrado en la anterior figura, es un disyuntor tipo Hyrax de 4 bandas, este está compuesto por un tornillo disyuntor que puede ir de 7 a 11 mm dependiendo del tratamiento, unos brazos conectores con el primer premolar y molar de acero inoxidable y elementos de retención que se denominan bandas, estas pueden ser de 2 o 4 (Reyes & Comas, 2015).

2.5.2. DISYUNTOR TIPO HASS

El primer aparato expensor Hass fue popularizado entre 1961 y 1980 en EEUU, este cuenta con bandas ubicadas en los primeros premolares y molares superiores como se muestra en la Figura 11, la expansión se genera mediante un tornillo que está en la parte central de las dos masas de acrílico (Castilla & Martínez, 2015).

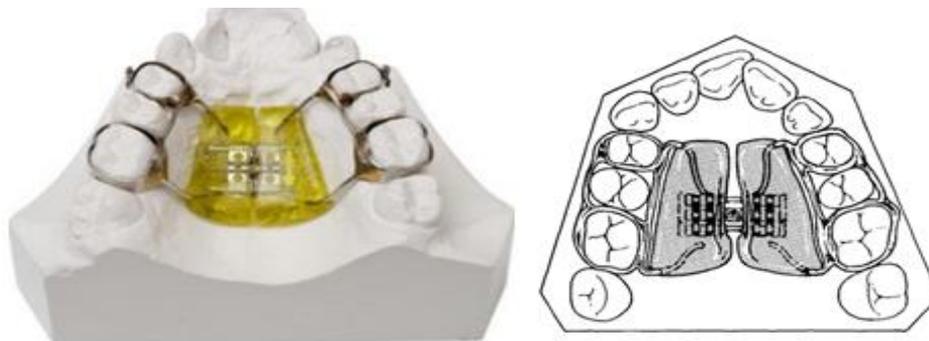


Figura 11. Disyuntor Tipo Hass tomado de (Ortoreding, 2018, pág. 1).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Haas estableció en 1961 que, mediante la cubierta acrílica palatina, las fuerzas generadas se distribuyen uniformemente no solo a los dientes sino también a los tejidos blandos y duros del paladar, mejorando el movimiento de traslación de los molares y premolares (Zambrano Mata, 2009).

2.5.3. DISYUNTOR TIPO MCNAMARA

El disyuntor McNamara (Figura 12) se debe al Dr. James McNamara, un innovador en tratamientos ortodóncicos que creo este dispositivo en 1987, también se le conoce como disyuntor palatino dento-soportado (Livas Lara, 2015). En este se utiliza una férula de acrílico para sujetarse a los dientes, y no bandas como en los dispositivos Hass o Hyrax. Los planos acrílicos se unen por una estructura metálica donde están soldadas a un tornillo en el centro del paladar. Este procedimiento es empleado en pacientes que sufren de maloclusión sagital clase III ya que este ejerce un control del maxilar superior mejorando su desarrollo (Clinica dental los Valles, 2020)



Figura 12. Disyuntor Tipo McNamara tomado de (Clinica dental los Valles, 2020, pág. 1).

2.6. ELEMENTOS FINITOS

El método de elementos finitos es un procedimiento numérico que permite resolver problemas de mecánica de sólidos, transferencia de calor, transporte de masa y potencial electromagnético. Es una herramienta que proporciona la solución aproximada a la

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

ecuación diferencial que describe el fenómeno modelado, a esto se le suma el juicio ingenieril para encontrar la respuesta final de un modelo (Nápoles Padrón, Gonzáles Carbonell, & Olivares Díaz, 2015)

Para encontrar la solución de un problema, normalmente los científicos usan expresiones diferenciales, pero cuando tienen un ejercicio que incluye sólidos con geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de propiedades de materiales, no es fácil encontrar la respuesta requerida con este método. Por tal motivo, es usado el método de elementos finitos, debido a que este permite plantear el sistema con una serie de ecuaciones algebraicas simultaneas, que logran obtener una respuesta aproximada a las incógnitas que se están buscando. Para ello, el modelo se discretiza (Figura 13), es decir, que se divide en un numero finito de secciones más pequeñas, las cuales están definidas por medio de puntos comunes conocidos como nodos (Universidad de las Américas Puebla, 2021).

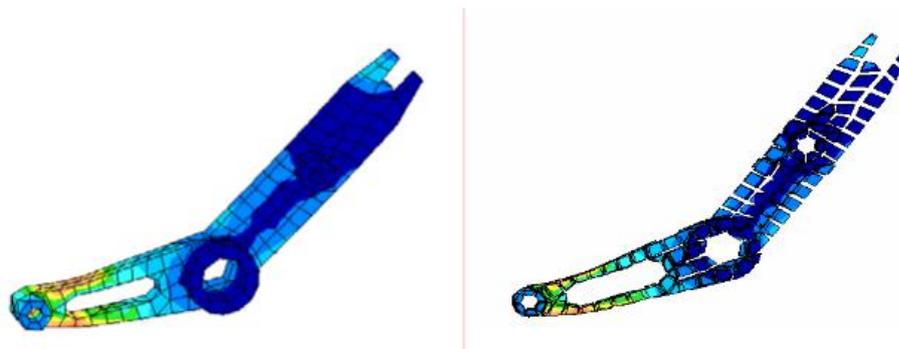


Figura 13. Discretización tomada (Universidad de las Américas Puebla, 2021, pág. 21)

Un sólido es la unión de varios nodos que tienen diferentes grados de libertad dentro del elemento. Por ejemplo, en problemas estructurales pueden existir tres grados de libertad rotacionales y tres translaciones en los ejes X , Y y Z . La geometría del modelo, es la que define todas las cualidades de los nodos y el tipo de discretizado que se va a

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

utilizar para el análisis, este puede ser en línea, en área o en volumen. Para el lineal se tiene una barra biarticulada la cual se puede ver en la Figura 14, esta se encuentra definida por los nodos 1 y 2, si se desea conocer el comportamiento de esta barra, solo se pueden tener en cuenta las cargas axiales que actúen sobre los dos nodos (Morales Quispe, 2021).

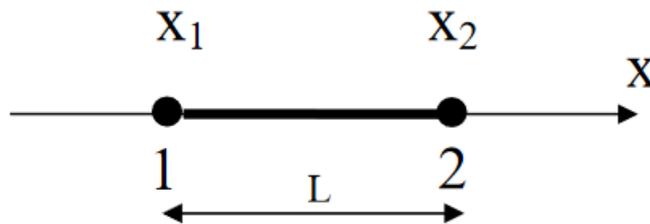


Figura 14. Nodo Lineal tomado (Navarro Ugena & Pérez Castellanos, 2021, pág. 4).

Los nodos en un área como la Figura 15, se usan para conocer la respuesta de problemas bidimensionales, pueden tener forma triangular, rectangular y cuadrilateral, de esto depende la cantidad de nodos que tenga el sistema (Diaz del Castillo Rodriguez & Ferrari Mora, 2018).

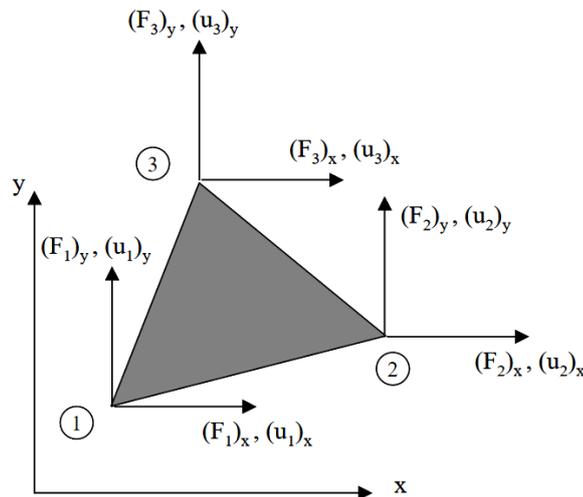


Figura 15. Nodo bidimensional tomado de (Navarro Ugena & Pérez Castellanos, 2021, pág. 10).

Por último, se encuentra el volumétrico como se ve en la Figura 16, este permite solucionar sistemas tridimensionales, además está conformado por un número finito de nodos lineales (Diaz del Castillo Rodriguez & Ferrari Mora, 2018).

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

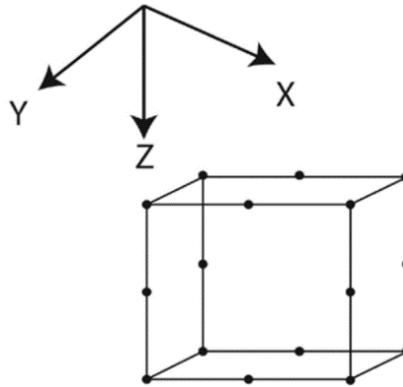


Figura 16. Nodo Tridimensional tomado de (Pallares Muñoz & Pulecio Díaz, 2017, pág. 151).

2.7. ANTECEDENTES

Se han realizado diferentes investigaciones por el método de elementos finitos que aportan conocimiento de la zona bucal durante el procedimiento de la expansión rápida de maxilar.

La investigación de Iseri, Tekkaya, & Bilgic (1998) evaluó, por medio del método de elementos finitos el efecto producido por la ERM sobre el complejo craneofacial, el estudio se realizó basado en un niño de 12 años, que tenía la base del maxilar estrecha y mordida cruzada bilateral. Las tensiones provocadas por el disyuntor generaron un ensanchamiento muy definido en las estructuras dentoalveolares y en el suelo de la cavidad nasal, sin embargo, no se observó desplazamiento lateral a nivel frontal, parietal, temporal ni occipital. Los resultados de esta investigación refieren que el tratamiento aparte de alinear el maxilar con la mandíbula también afecta en menor medida a las diferentes estructuras del complejo craneofacial.

Ciro, *et. al.* (2011), realizaron un estudio acerca de los tratamientos para la maloclusión clase II, entre estos se encuentran la extracción de dientes permanentes y la distalización de los molares maxilares con aparatos extraorales e intraorales. Esta investigación se centró en explicar los efectos que se esperan dependiendo del tipo disyuntor que se use

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

para el tratamiento, ellos concluyeron que, para tener buenos resultados, primero se debe estudiar a profundidad el caso para escoger el disyuntor apropiado. Debido a que cada uno de estos aparatos presentan propiedades mecánicas diferentes y también ventajas y desventajas dependiendo del resultado que se desee lograr.

De Sousa Araugio, *et. al.* (2013), analizaron la influencia de la altura del tornillo disyuntor de un aparato hyrax al efectuar un procedimiento de expansión rápida del maxilar por medio de elementos finitos. Ellos modelaron tres disyuntores y los coloraron a diferentes alturas con relación al plano que intercepta con el centro de resistencia de los primeros molares. El modelo que se ubicó cerca al plano oclusal presento una mayor inclinación en la corona dental. Por otro lado, el hyrax que se colocó por encima de este plano podría generar luxaciones dentales. Por último, el dispositivo que se ubicó por debajo del plano oclusal ocasionó un desplazamiento mesial en los dientes.

Lee, *et. al.* (2016), evaluaron los efectos de la ERM en el esqueleto craneofacial de un paciente que tiene labio leporino unilateral y paladar hendido, con el fin de conocer los puntos óptimos para la aplicación de las fuerzas de expansión, por medio de un modelo tridimensional de elementos finitos. Al realizar el estudio observaron que en el cuerpo del esfenoides y en el procedimiento cigomático del maxilar tenían concentraciones de esfuerzo. Por otro lado, en la parte craneofacial la distribución de fuerzas fue asimétrica con mayores niveles de tensión en el lugar de la hendidura.

Guerrero *et. al.* (2019), analizaron el comportamiento mecánico de la sutura mesiopalatina al realizar una expansión rápida del maxilar por medio del método de elementos finitos. Para esto reconstruyeron una tomografía y modelaron la sutura con tres niveles de interdigitación y cuatro tipos de dispositivos de expansión, en el estudio tuvieron en cuenta las tensiones principales del hueso. Ellos llegaron a la conclusión de

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

que la interdigitación no tiene influencia en los desplazamientos, pero si tiene repercusión en la distribución de esfuerzos; de este modo especifican que los anclajes esqueléticos son más efectivos que los dentales al momento de transmitir el desplazamiento a la región de la sutura mesiopalatina.

Guerrero Vargas (2019), analizó el proceso de formación de la sutura mesiopalatina y la respuesta a la presencia de cargas externas, ocasionadas al realizar un proceso de expansión rápida del maxilar de forma experimental y computacional. Para el estudio experimental utilizaron un procedimiento *in vivo* en ratones, se les colocaron resortes de expansión en la cavidad bucal teniendo en cuenta las cargas y el tiempo de tratamiento. Por otro lado, modelaron y analizaron la respuesta biomecánica de la cavidad bucal al realizar una ERM, con diferentes niveles de interdigitación. Obtuvieron como resultado que la interdigitación tiene poca influencia en los desplazamientos, pero afecta las cargas que interactúan con las interfaces en estudio. Por otro lado, concluyeron que el tipo de anclaje esquelético es más efectivo al realizar la expansión, pero ocasiona mayores esfuerzos en el tejido.

Vélez Muriel (2020), estudiaron el defecto congénito del paladar hendido y los efectos ocasionados por las terapias de maxilar al tener un injerto alveolar con diferentes grados de osificación, por medio del método de elementos finitos. Para esto realizaron la reconstrucción de una tomografía, a la cual le hicieron cinco patrones de hendidura y utilizaron las cargas mecánicas de la protracción de maxilar, expansión maxilar y masticación sin terapia ortopédica. Obtuvieron que los cráneos con un injerto alveolar con un 100% de osificación, soportan mayores tensiones y tienen menos deformación que un cráneo sano.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Guzmán Martínez & Aristizabal Mulett (2020), analizaron la respuesta biomecánica del ligamento periodontal al aplicarle una fuerza de expansión por medio de una ERM con alineadores termoformados, con y sin aditamentos en resina, por medio del método de elementos finitos. Al realizar la simulación del modelo llegaron a la conclusión de que el uso de los aditamentos reduce la inclinación de los dientes cuando se hace el movimiento dental. Además, evidenciaron que al no superar el límite del LPD, al realizar el procedimiento de la expansión rápida de maxilar, no ocasiona ningún daño en la estructura del tejido.

De acuerdo con las investigaciones consultadas, algunos de los criterios relevantes al estudiar la expansión rápida de maxilar son: que el anclaje esquelético usado en la ERM es el dispositivo de expansión que genera mayor variación en el esfuerzo ocasionado, a pesar de ello es el más efectivo al realizar este tratamiento. También, se debe tener en cuenta que no todos los dispositivos de expansión van a obtener el mismo resultado en el paciente, ya que esto depende de la morfología del individuo y lo compatible que sea esta con el dispositivo. Además, es importante ubicar el dispositivo en el plano oclusal correcto, debido a que de este depende el resultado de la ERM. Finalmente, otro de los criterios importantes a tener en cuenta al realizar este tipo de procedimientos, es que este no solo cambia la distancia transversal entre los dientes, sino también altera el funcionamiento y la ubicación de las otras estructuras de la cavidad bucal.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGÍA

3.1. RECONSTRUCCIÓN DE LA TOMOGRAFIA

Una tomografía computarizada (TC) dental logra obtener imágenes en tres dimensiones de las estructuras óseas y dentales del maxilar superior e inferior. Con los resultados de la TC se puede planificar un tratamiento minucioso antes de ser ejecutado, este procedimiento se implementa en patologías de mal formaciones, regeneraciones de hueso, entre otras (Jorge Ferrus, 2021). Debido a esto, en esta investigación se hace uso de este tipo de imágenes, para generar un modelo basado en datos reales, y así lograr que los resultados de esta tengan mayor validez. La tomografía utilizada para realizar el modelo 3D fue suministrada por el semillero de investigación DIMBIO de la universidad ECCI. Esta muestra pertenece a una persona adulta, que no presenta ninguna patología en la estructura ósea del cráneo y que todos sus tejidos se encuentran en buen estado. Para la reconstrucción tomográfica se utilizó un software de análisis medico con licencia libre 3D Slicer (Brigham and Women’s Hospital (BWH), Cambridge, EEUU) versión 4.11, este se usó gracias a su capacidad para visualizar y analizar imágenes DICOM, además de permitir la construcción del modelo 3D.

La primera fase para obtener la geometría en 3D Slicer, fue cargar las imágenes de la TC por medio del módulo *Data*, donde se procesa la información y se genera la clasificación de las imágenes de los tejidos del cuerpo (sistema óseo, muscular, vascular, arterial, entre otros). Luego en el módulo *Volume Rendering*, se seleccionó el grupo de imágenes que se desea ver (finos óseos). Después, por medio de la opción *Display* del mismo modulo, se escogió el sistema óseo (CT-AAA) y se estableció la densidad (la más alta). Estando en el mismo apartado se utilizó la herramienta *Display Roi* en la cual se

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

definió el dominio de la pieza, ya que el estudio se enfoca en el maxilar, se suprimió gran parte de la mandíbula, sin que afectara las demás partes del cráneo que se iban a reconstruir. Luego en el módulo *Crop Volume* se realizaron los cortes pertinentes para conseguir la geometría que se va a utilizar para la obtención del modelo final como se observa en Figura 17.

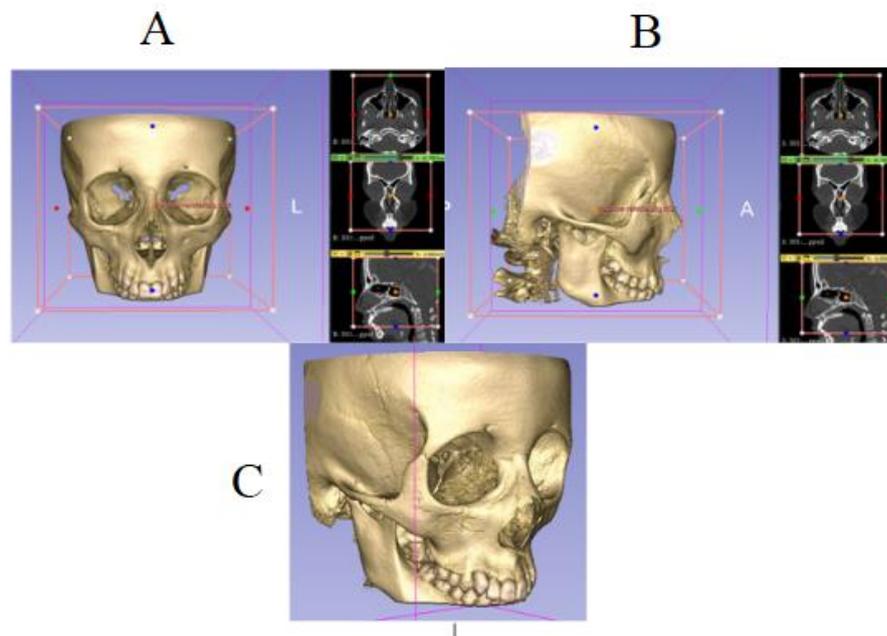


Figura 17. Obtención de las piezas de estudio en 3D Slicer. A) vista frontal, B) vista lateral y C) vista isométrica.

Posteriormente, se ingresa al módulo *Segment editor*, donde se utiliza la herramienta *Threshold* que permite seleccionar un rango de densidad para definir los elementos que se desean modelar. Con esta operación y con ayuda de la vista coronal, sagital y axial, se logra establecer los parámetros necesarios para generar la geometría 3D del cráneo y de las unidades dentarias. Luego, con las demás opciones que tiene este apartado para editar los modelos (*Scissors, paint, draw, erase y island*) se modificó la estructura, para obtener individualmente los tejidos que componen el ensamble. Además, se utilizaron estas mismas herramientas para eliminar cualquier espacio o vacío que existiera entre el hueso cortical y trabecular, con el fin de conseguir un cuerpo totalmente sólido. Después con el

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Smoothing se suavizó la superficie de cada objeto para lograr un mejor acabado en las caras externas, sin perder definición del modelo, como se muestra en la Figura 18.

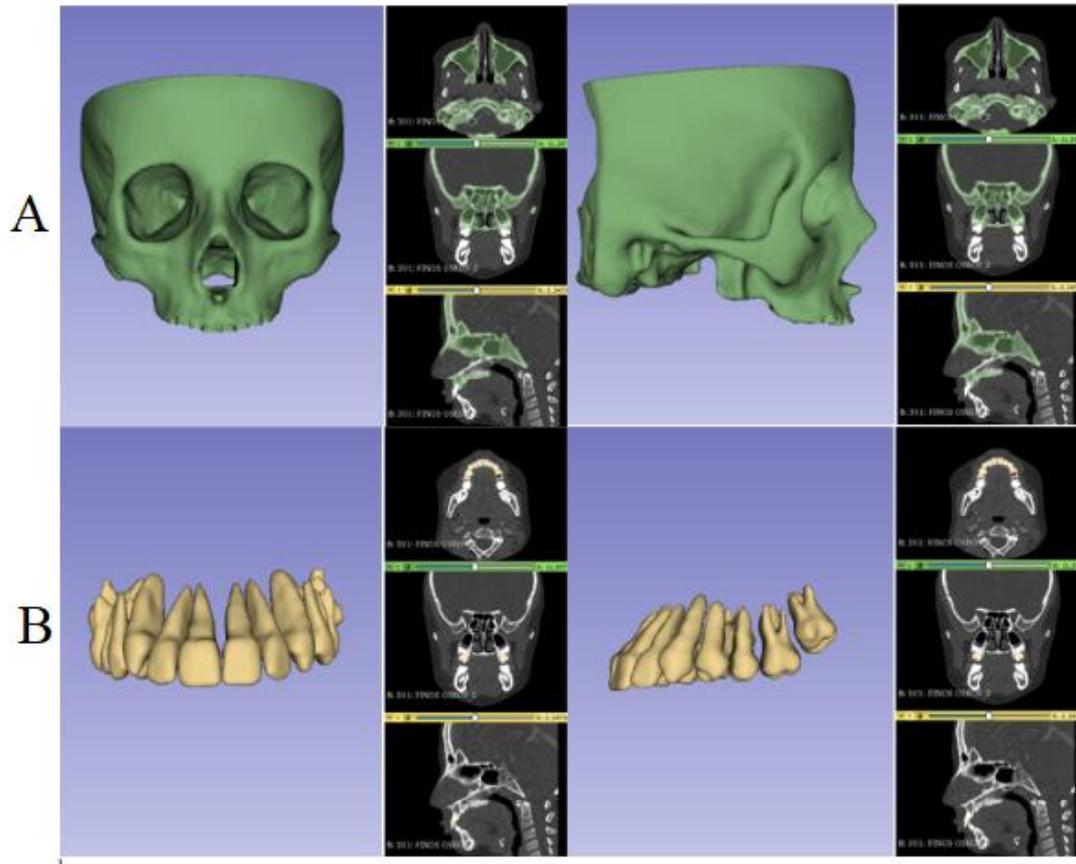


Figura 18. Suavizado de la superficie del cráneo y dientes en 3D Slicer. A) cráneo y B) dientes.

Ya que no se cuenta con un software de licencia libre que logre definir con exactitud el espesor del ligamento periodontal, se usó 3D Slicer para conseguir un diseño con un grosor lo más semejante a la realidad. Para esto se utilizó la geometría de los dientes y el cráneo, además de las herramientas *erase* y *paint* del módulo *Segment editor*. El procedimiento consta de quitar superficie a la corona de cada unidad dentaria con el fin de conseguir un espacio entre el diente y el cráneo, el cual se rellenará para generar el ligamento periodontal con un espesor entre 0.15mm y 0.2 mm, el resultado final se puede ver en la Figura 19.

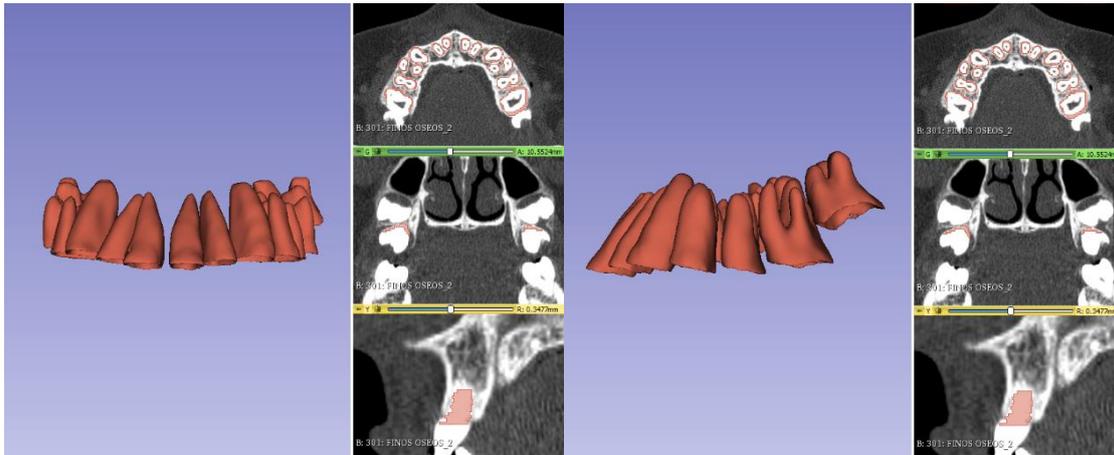


Figura 19. Obtención de los ligamentos periodontales.

3.2. OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA

El modelo obtenido de 3D Slicer, está conformado por una malla refinada de 1'784.440 caras y 892.256 vértices (Figura 20A). Para reducir los tiempos de ensamble y simulación se utilizó un programa con la capacidad de disminuir la cantidad de elementos sin alterar o dañar la definición de las piezas, este es MeshLab 2022.02 (ISTI-CNR, Pisa, Italia). A este software que se exportó el diseño, es de código abierto y permite editar, limpiar, reparar e inspeccionar mallas por medio de la parametrización cuadrática. Al realizar el procedimiento de reducción de malla se consiguió un modelo con 80.000 caras y 40.000 vértices como se muestra en la Figura 20B.

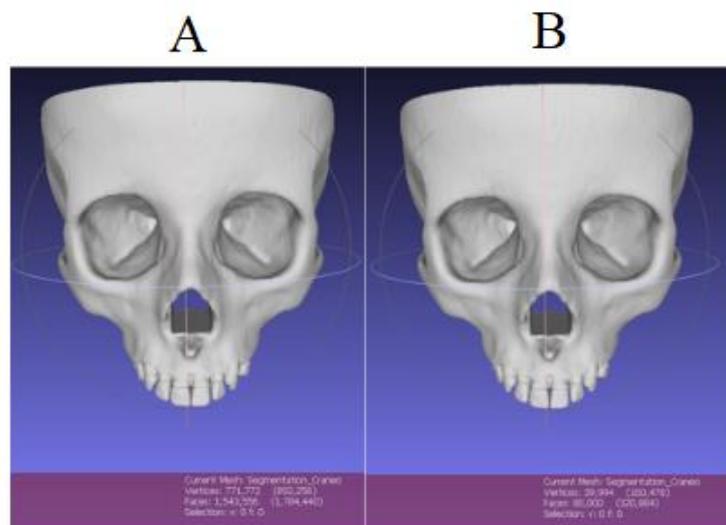


Figura 20. Reducción de caras y vértices en Meshlab. A) sin reducción y B) con reducción.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Luego se importaron los archivos a FreeCAD 0.19 que es un software de código abierto que permite conocer si la malla obtenida en MeshLab tiene algún problema de interferencia o de reconstrucción, además consigue una estructura sólida de una malla. Para esto se hace uso del módulo *Mesh Desing*, el cual tiene las herramientas *Evaluar* y *reparar malla*, en donde se puede analizar cada una de las piezas que componen el ensamble, como se puede ver en la Figura 21. Al finalizar con este proceso se utiliza el módulo *Part* y la opción de *Crear forma de malla* para obtener el sólido en formato IGS que se va a exportar al software Autodesk Inventor (Autodesk, California, EEUU).

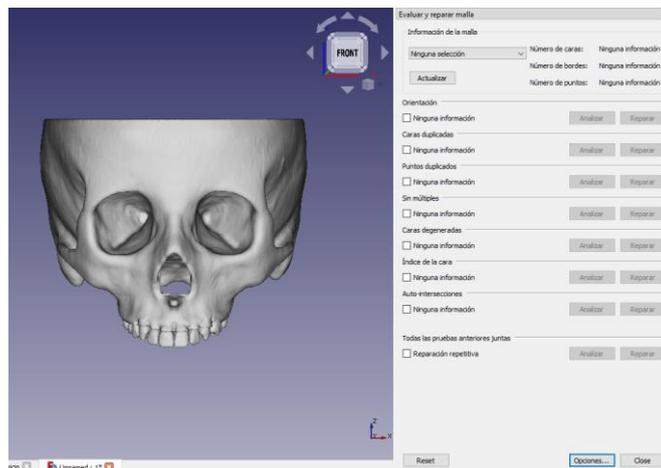


Figura 21. Verificación de interferencias en la malla del sólido en FreeCAD.

Se importa el archivo IGS al programa Autodesk Inventor 2021 donde se utiliza la herramienta *Coser* del módulo *Superficies* para unir cada una de las caras que componen las piezas. En este mismo software se editó el cráneo para obtener un modelo con la sutura medial palatina con espesor de 0.2 mm. Además, se realizó el diseño de los disyuntores que van a ser utilizados para simular la expansión rápida del maxilar y de los brazos que unen el dispositivo a las unidades dentarias. Se hicieron tres diseños de aparatos expansores, dos de ellos son de anclaje dental y uno con anclaje dentó-esquelético. Para el hyrax dentó-esquelético y el de anclaje dental convencional, se utilizaron los mismos brazos de sujeción, por otro lado, para la variación del dental, se crearon unos brazos de

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

sujeción diferentes. Por su parte, los anillos de sujeción con las piezas dentarias fueron los mismos para los tres modelos de hyrax, el resultado de esto se puede ver en la Figura 22.

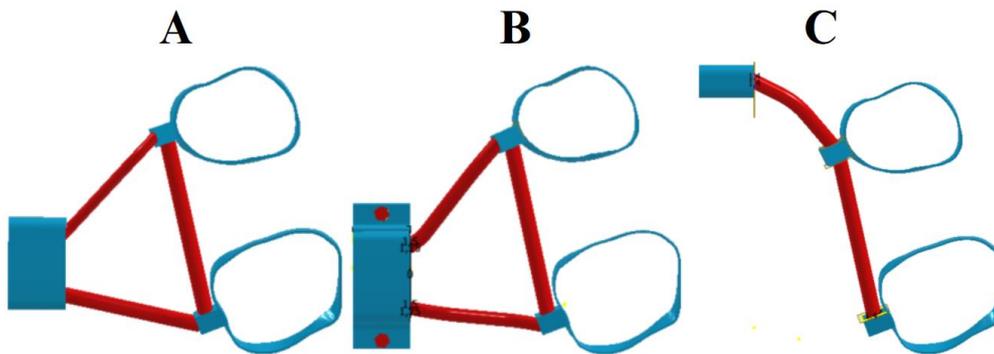


Figura 22. Dispositivos de expansión diseñados. A) anclaje dental convencional, B) anclaje dentó-esquelético y C) variación del anclaje dental.

Para optimizar el costo computacional se optó por cortar el cráneo coronalmente, como se ve en la Figura 23. De esta forma se consiguió reducir a la mitad, la cantidad de objetos que componen el ensamble. Esto se puede hacer ya que a pesar de que el cráneo tiene pequeñas diferencias entre sus lados, estas no son tan relevantes al analizarlo mecánicamente, por lo cual se realiza una simetría de este (Li, *et. al.* 2011). Debido a esto, en el método de elementos finitos se realizó una condición de simetría de los componentes izquierdos del cráneo, para mostrar el comportamiento total del modelo.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009



Figura 23. Corte coronal del cráneo

Finalmente, se ensamblaron cada una de las piezas para conseguir el modelo final de estudio y se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 24.

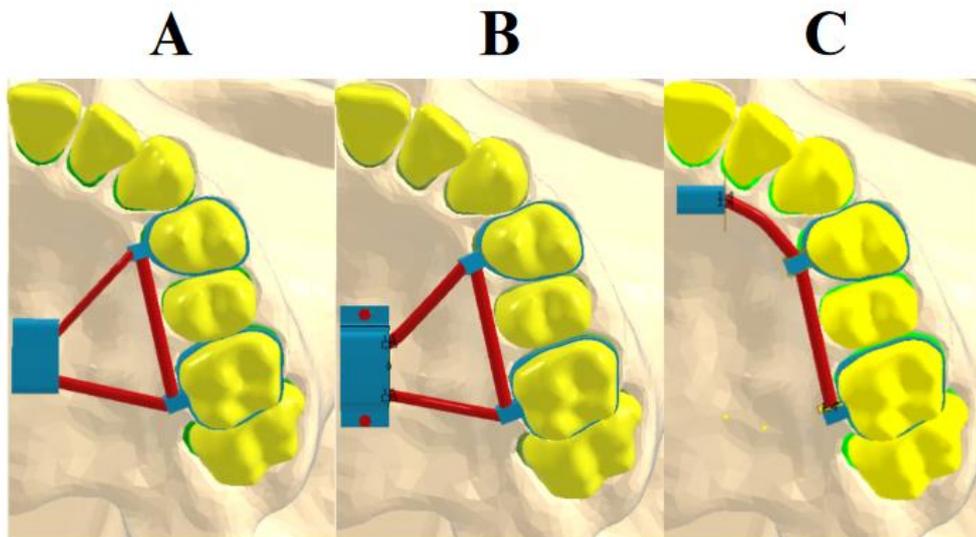


Figura 24. Ensamble de todos los elementos. A) anclaje dental convencional, B) anclaje dentó-esquelético y C) variación del anclaje dental.

3.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

3.3.1. MALLADO

El modelo final se exporto en formato IGS al programa de simulación por elementos finitos ANSYS 17.0 – Workbench (Ansys, Canonsburg, EEUU), para conocer su

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

funcionamiento por medio de un análisis estático. Este software permite evaluar el comportamiento de una estructura al ser sometida a distintas condiciones de carga; además, en este mismo se pueden definir las características del material que se va a utilizar para el estudio. Con los datos obtenidos se pueden analizar los esfuerzos mecánicos, desplazamientos y deformaciones que va a tener el objeto al ser sometido a las condiciones de frontera especificadas.

Se realizaron 3 análisis principales en este software, cada uno de ellos está compuesto por el cráneo, dientes, ligamentos periodontales y dispositivos de expansión. Con el fin de conocer el comportamiento de los LPD con distintos expansores, en cada uno de los análisis se utilizó un anclaje del hyrax diferente. Por otro lado, se realizaron 4 análisis secundarios, los cuales fueron utilizados para hacer validaciones y comparaciones con otros autores. En todos los modelos se utilizó el módulo de *Static Structural* y se definieron las mismas propiedades mecánicas de los materiales.

El software por defecto da una malla con una calidad estándar, esto hace que existan concentradores de esfuerzo y que los resultados no den valores cercanos a la realidad. Por tal motivo, para mejorar la calidad de la malla se utilizaron las herramientas del módulo de malla de Ansys llamadas *Body Sizing*, *Face Sizing*, *face meshing* e *inflation*. Al hacer este proceso en el modelo con expansor dental convencional se consiguió lo mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1

Cantidad de nodos y elementos de la malla para cada modelo.

Modelo	Antes de refinar		Después de refinar	
	Nodos	Elementos	Nodos	Elementos
Dental convencional	997.530	574.704	1'204.544	726.351
Dentó-esquelético	1'003.611	577.635	1'211.596	729.360

Variación de anclaje dental	576.008	1'000.070	1'203.812	726.000
-----------------------------	---------	-----------	-----------	---------

En la

Figura 25 se observa la malla conseguida al refinarla. En estas imágenes se ven unas graficas de barras en donde el eje X es la calidad de malla y el eje Y es la cantidad de elementos que se encuentran en dicho porcentaje de calidad. Para el software lo ideal es que la mayoría de objetos se encuentren los más cercano a 1, es decir que exista una homogeneidad en la geometría, tanto en el tamaño de los elementos, como en la forma de estos mismos. En la presente investigación, la mayoría de elementos se encuentran en una calidad de 88% para los tres modelos creados; es decir, que se logró mejorar la malla para obtener resultados más precisos en la simulación.

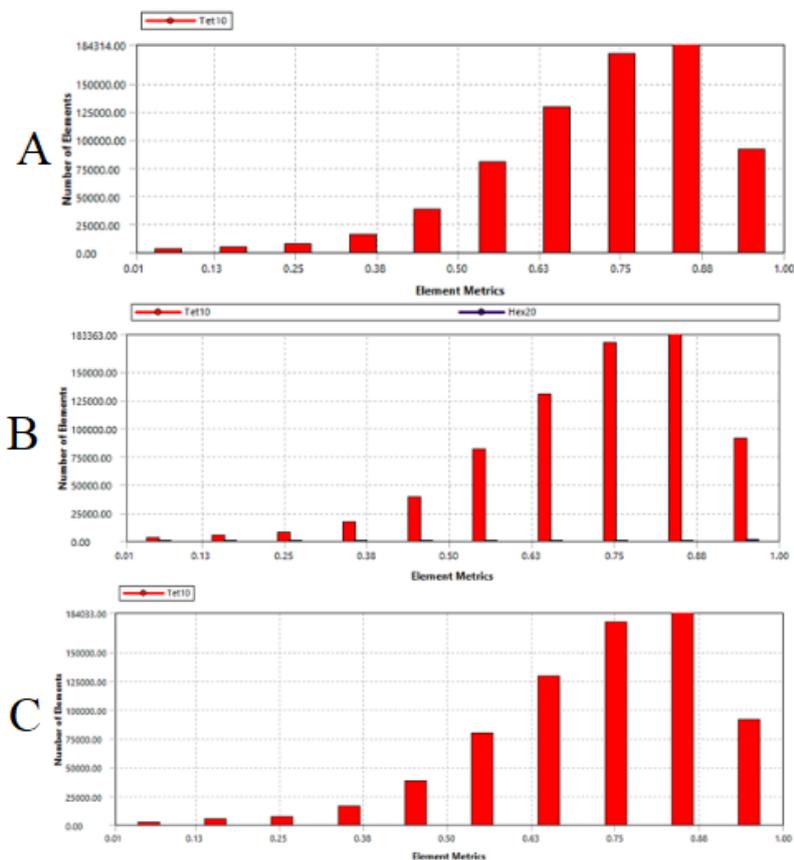


Figura 25. Calidad de la malla refinada. A) anclaje dental convencional, B) anclaje dentó-esquelético y C) variación del anclaje dental.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

3.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

El hueso humano está compuesto por dos tipos de hueso, el trabecular y el cortical, a pesar de esto, para el análisis solo se van a utilizar las propiedades mecánicas del hueso cortical. Esta simplificación es válida, ya que en estudios realizados anteriormente se confirma que omitir el hueso trabecular no afecta la deformación resultante de la estructura ósea (Cheng, Cheung, & Chow, 2010; Toro - Ibacache, Zapata Muñoz, & O'Higgins, 2016). Los dientes están compuestos por el esmalte, dentina y cemento, a pesar de esto solo se utilizaron las propiedades mecánicas de la dentina, ya que constituye la mayor parte del diente y es una de las estructuras que ayuda a soportar las fuerzas oclusales (Fuentes Fuentes, 2004). Para los dispositivos de expansión se utilizaron las características de acero, ya que es el material en el que comúnmente se fabrican estos tipos de expansores (Dentaurum). Los tres materiales mencionados anteriormente se tomaron como isotrópicos, homogéneos y lineales, los valores utilizados se encuentran en Tabla 2 (Martinez, Schweizerhof, & Schindler, 2015). Por otro lado, para los ligamentos periodontales se utilizó un material viscoelástico y no lineal, ya que es una estructura que distribuye y soporta altas cargas de forma no homogénea, las propiedades tomadas se observan en la Tabla 3.

Tabla 2

Propiedades mecánicas de los materiales lineales.

Material	Módulo de Young [MPa]	Relación de Poisson	Referencias
Hueso Cortical	13700	0.3	(Benazzi, Nhu Nguyen, Kullmer, & Kupczik, 2016)
Dentina	18600	0.31	(Pegoretti, Fambri, Zappini, & Bianchetti, 2002)
Dispositivo de expansión	2×10^5	0.3	(Tanaka, Yukio Saga, Melo Pithon, & Andre Argenta, 2016)

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Tabla 3

Propiedades mecánicas de los LPD.

Material	Módulo de Young [MPa]	Relación de Poisson	Modulo Relativo	Tiempo de relajación	G	Referencias
LPD	0.23	0.49	0.0025 0.1 0.5	0.155 0.4 0.15	0 0 0	(Zen su, y otros, 2013)

3.4.CONDICIONES DE FRONTERA

3.4.1. SIMETRIA

Teniendo en cuenta que solo se tiene la parte izquierda del cráneo se realizó una simetría del modelo, para esto se activó la opción *Beta option*, al hacerlo se habilita el módulo de simetría en el árbol de trabajo del workbench. Se uso una simetría de región, esta se hizo en base al maxilar, el parietal y el foramen magnum, como se muestra en la Figura 26. Para generar la otra mitad del cráneo se definió que el modelo tenga 2 repeticiones y, por último, se determinó la distancia entre piezas de 1.27 mm. De esta forma se obtuvo un modelo del cráneo completo, este se muestra en la Figura 26B.

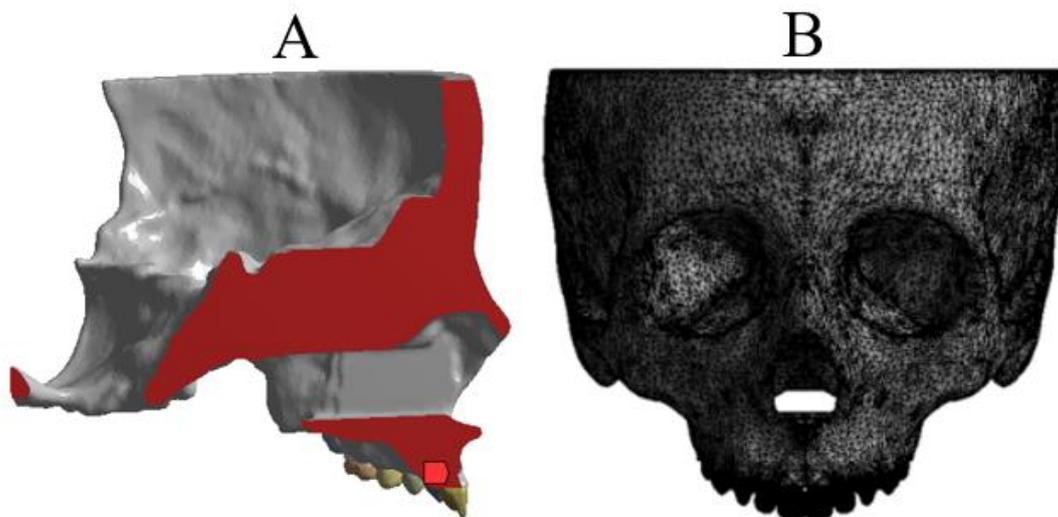


Figura 26. Simetría. A) Cráneo y B) malla por defecto.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

3.4.2. SOPORTE Y RESTRICCIONES

Las condiciones de frontera utilizadas en los modelos con anclaje dental se hicieron con base a los criterios de la literatura encontrados por Prado *et. al.* (2016) y MacGinnis, *et. al.* (2014). En primer lugar, se restringió la estructura en el foramen magnum mediante un soporte fijo, es decir, que está restringido en todos los grados de libertad, como se evidencia en la Figura 27A. Por otro lado, se aplicó una condición de desplazamiento nulo en el área frontal y parietal del cráneo, esto se hizo colocando el valor de 0 en el desplazamiento del eje z y para los dos ejes restantes se dejaron libres, como se ve en la Figura 27B. Así mismo, en el dispositivo de expansión también se usó una condición de desplazamiento, en esta se colocó 0 en z y los ejes restantes se dejaron libres, esto se realizó porque el tornillo disyuntor impide los movimientos en la coordenada z, cómo se observa en la Figura 27C (Guerrero Vargas, *et. al.* 2019). Por último, en el modelo con anclaje esquelético se utilizaron las restricciones antes nombradas, con la diferencia que este contiene dos injertos que fijan el tornillo disyuntor al paladar del cráneo, como se ve en la Figura 27D.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

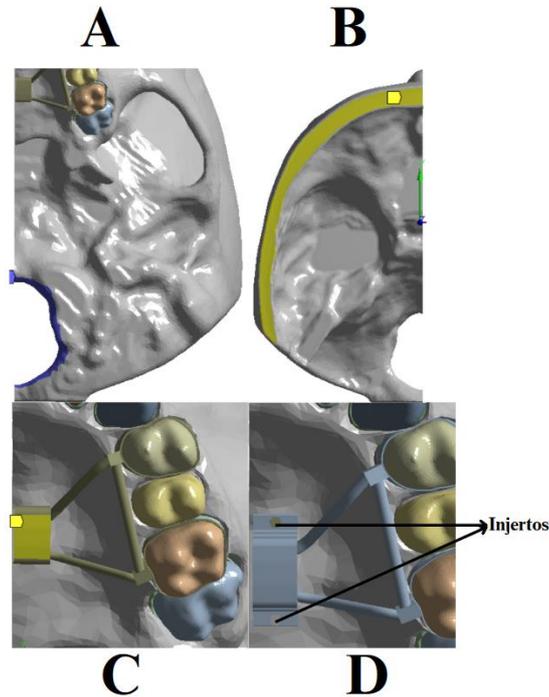


Figura 27. Condiciones de frontera. A) soporte fijo en el foramen magnum, B) restricción en el parietal C) restricción del tornillo disyuntor y D) Injertos del anclaje esquelético.

3.4.3. CONDICIONES DE CARGA

Las cargas que se utilizan para la simulación de una expansión rápida de maxilar son los desplazamientos generados por el dispositivo de expansión, que se aplica tanto en el primer premolar como en el primer molar. Según lo reportado en la literatura por cada cuarto de giro que se le aplica al tornillo del disyuntor, este ocasiona un desplazamiento que va desde 0.125 mm hasta 0.25 mm en dispositivo de expansión (Trojan Serpe, *et. al.* 2014). Para esta investigación en todos los dispositivos se utilizó un desplazamiento de 0.125 mm, aplicados en las caras internas de los disyuntores. Adicionalmente, para el diseño que tiene soporte dental, los desplazamientos se restringieron en la base del dispositivo, en la dirección perpendicular a la expansión, esto debido a la presencia del tornillo de expansión que este restringe el movimiento en esta dirección, como se ve en la Figura 28.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

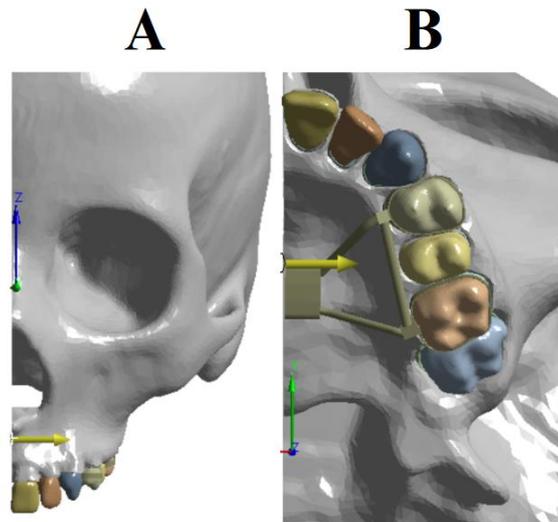


Figura 28. Condiciones de frontera, aplicación de los desplazamientos en el dispositivo de expansión. A) vista frontal y B) vista oclusal.

Adicionalmente, se agregaron las cargas de masticación con valores que han reportado varios autores y que se encuentran entre los 70 N hasta los 1100 N, solo en el maxilar. Es difícil establecer un valor de carga exacta, debido a que para cada persona intervienen diversos factores como lo son la morfología, edad y sexo (Youssedd, *et. al.* 1997). Para el modelo, las cargas se ubicaron sobre la superficie de oclusión del primer premolar, segundo premolar y primer molar, a cada una de las unidades dentarias nombradas se le aplicó una carga de 70 N (Janovic, *et. al.* 2015), en la dirección perpendicular a la oclusión de cada diente como se evidencia en la Figura 29 (Pinheiro & Alves, 2015). Se seleccionaron 70 N debido a que es un valor usado por varios autores consultados cuando se realizan análisis de elementos finitos (Guerrero Vargas, *et. al.* 2019; Trojan Serpe, *et. al.* 2014).

A

B

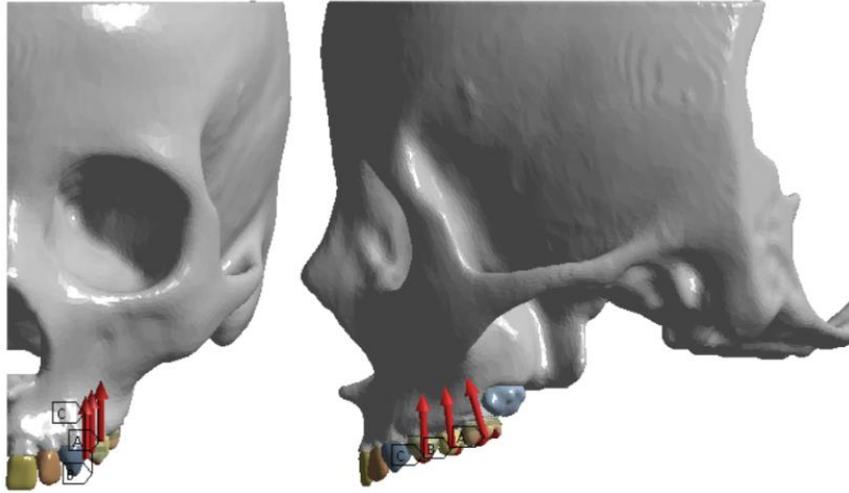


Figura 29. Condiciones de frontera, aplicación de las fuerzas en el plano oclusal de los dientes. A) vista frontal y B) vista lateral.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 4

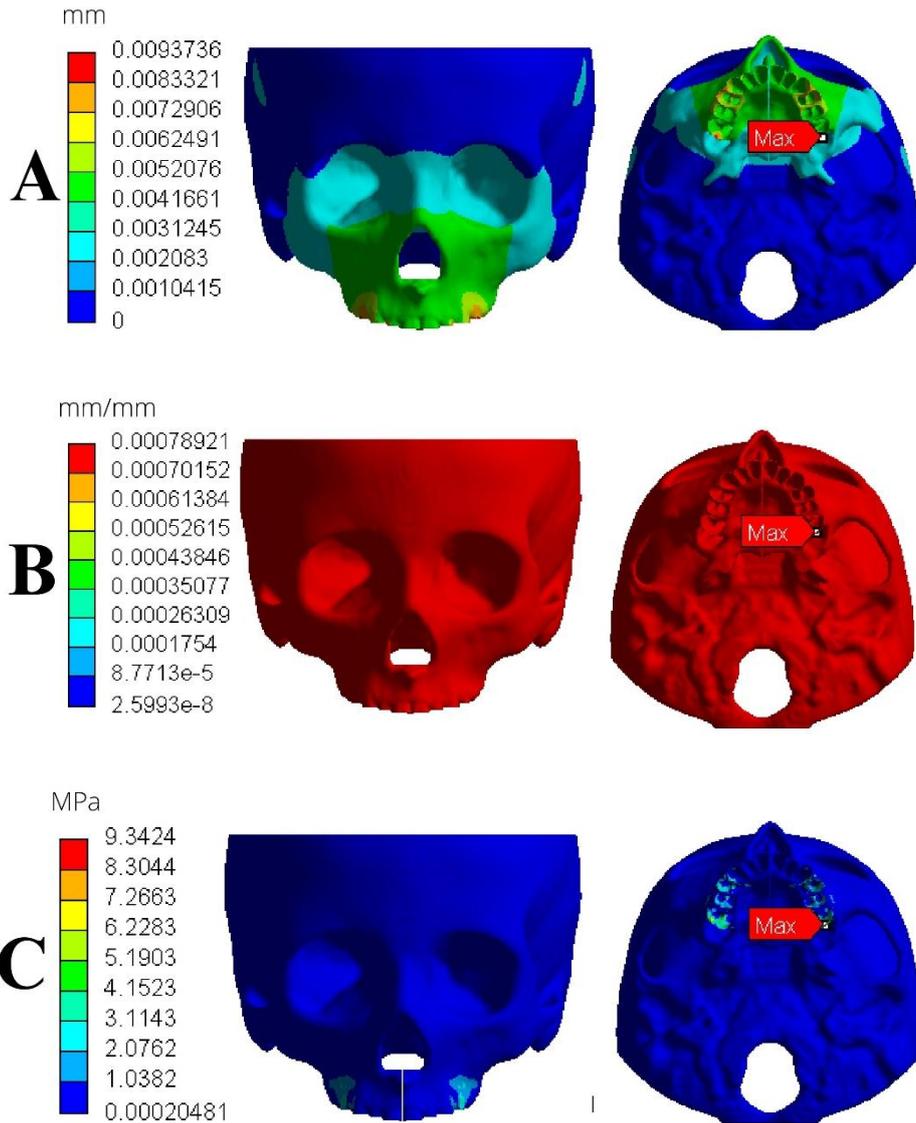
4. RESULTADOS

Las variables que se presentaran en cada uno de los resultados son las siguientes: deformación total, deformación unitaria, esfuerzo equivalente von Mises y esfuerzo máximo principal. Estas se seleccionaron, ya que la deformación total, mide el cambio total de longitud de un cuerpo al ser sometido a fuerzas externas, permitiendo conocer como las estructuras biológicas se deforman y se adaptan a estímulos mecánicos (Universidad Nacional Autónoma de Mexico, s.f.). Por otro lado, la deformación unitaria es un factor entre la longitud inicial y final de un objeto, que ayuda a determinar el cambio de longitud del mismo (Yépez Castillo, 2014). Así mismo, el esfuerzo equivalente von Mises se escogió ya que es una variable usada por varios autores, lo cual permite que se puedan comparar los resultados obtenidos con otras investigaciones (Cavas, Nieto, Cañavate, & Fernández-Pacheco, 2016). Por último, el esfuerzo máximo principal es una teoría que estudia materiales frágiles, que permite identificar zonas críticas del tejido óseo (Trojan Serpe, *et. al.* 2014; Guerrero Vargas, 2019; Guerrero Vargas, *et. al.* 2019).

4.1. EXPANSIÓN CON ANCLAJE DENTAL

Como se ve en la Figura 30A el cráneo tiene una deformación total máxima de 0.0094 *mm*, ubicada en la arcada dental del primer molar, a pesar de esto la deformación se extiende desde la sutura medial palatina uniformemente hacia los extremos, disminuyendo cuando llega al hueso cigomático. Por otro lado, en la deformación unitaria Figura 30B, se tiene un valor máximo de 0.0008 presentándose en la zona donde se ubica el primer molar, en esta figura también se evidencia que la deformación es similar en la mayoría del cráneo. En la Figura 30C se muestra el esfuerzo equivalente con un valor de 9.34 *MPa*, esta se presenta en el primer molar, además, se ve como el esfuerzo

se distribuye desde la cavidad del molar hacia el hueso maxilar, nasal, esfenoides y parte del hueso cigomático. Por último, en la Figura 30D se observa el esfuerzo máximo principal con un valor máxima de 9.8 MPa ubicándose también en la cavidad del primer molar.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

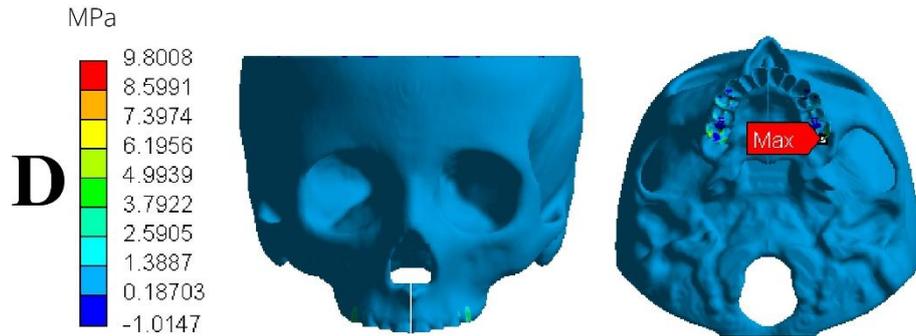
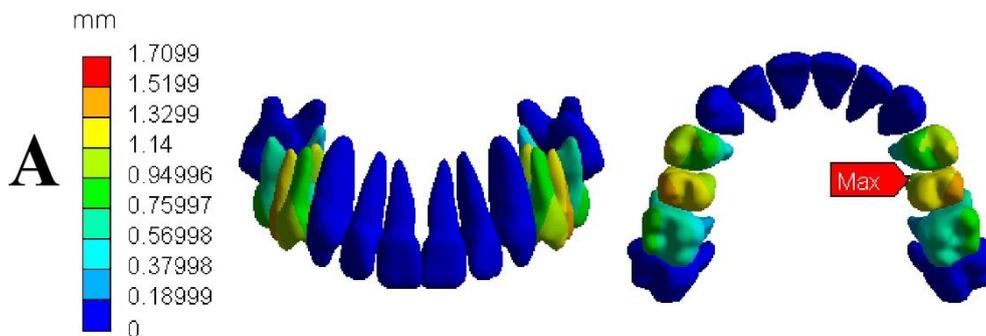


Figura 30. Resultados del cráneo con anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

En la Figura 31A se evidencia la deformación total de las unidades dentarias, con un valor máximo de 1.71 mm presentándose en la cara lingual del segundo premolar extendiendo por toda la estructura hasta llegar a la zona vestibular del molar. Como se ve en la Figura 31B la deformación unitaria máxima tiene un valor de 0.0055, dándose en la sección lingual del primer molar, en esta figura también se ve como en el resto de las estructuras dentales tienen un valor aproximado de 0.0030. Por otro lado, en la Figura 31C se tiene el esfuerzo equivalente con un valor de 69.14 MPa, presentándose en la zona lingual del primer molar, además se evidencia que las zonas de mayor esfuerzo son los lugares donde se conecta el anillo del hyrax con los dientes. Por último, en la Figura 31D se muestra que el máximo esfuerzo principal se encuentra en el rango de -22.6 MPa a 88.44 MPa, ubicando el valor maximo en el primer molar



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

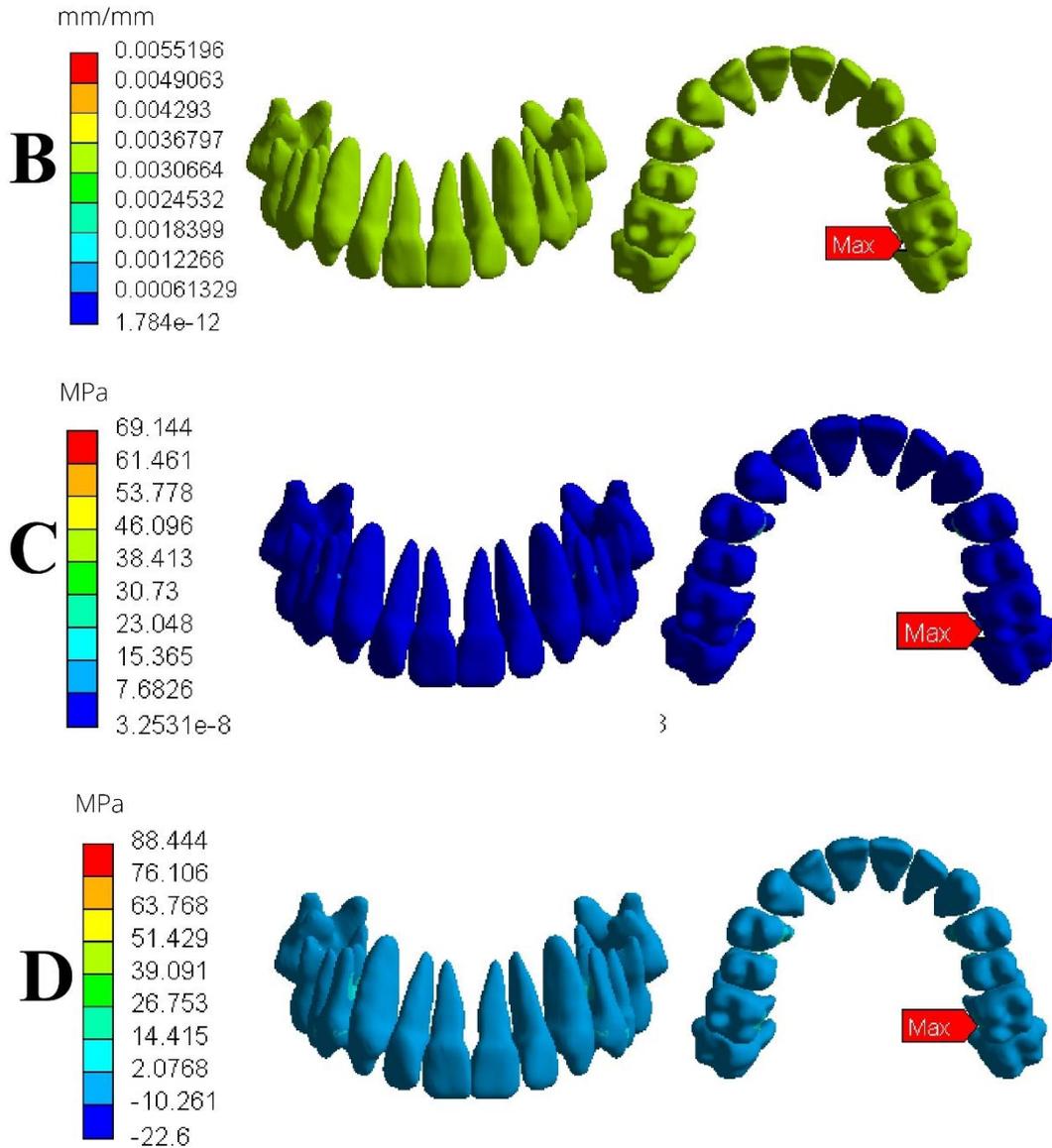
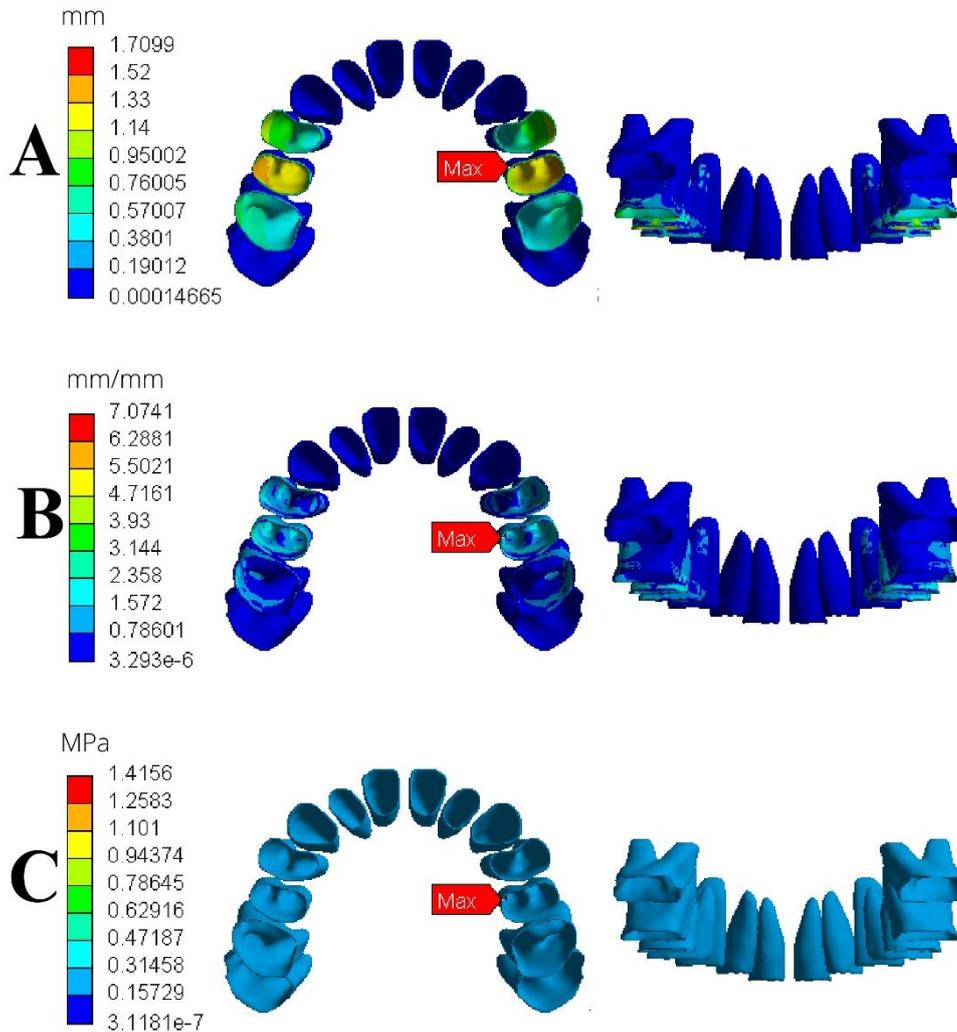


Figura 31. Resultados de los dientes con anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

En la Figura 32A se evidencia la deformación total de los ligamentos con un valor de 1.71 mm presentándose en la zona lingual del ligamento periodontal del segundo premolar, además se muestra que la deformación empieza en el interior de los ligamentos y se va distribuyendo hacia el exterior del mismo. Como se observa en la Figura 32B, la deformación unitaria tiene un valor de 7.07, ubicado en la zona lingual del ligamento del segundo premolar. En la Figura 32C se ve el esfuerzo equivalente con un valor de

1.42 MPa evidenciándose en la corona izquierda del segundo premolar, además en esta se ve como en el resto de los ligamentos el esfuerzo es constante. Por último, en la Figura 32D presenta el esfuerzo máximo principal con un rango de -1.69 MPa a 1.22 MPa, ubicando el valor maximo en la zona lingual del segundo premolar.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

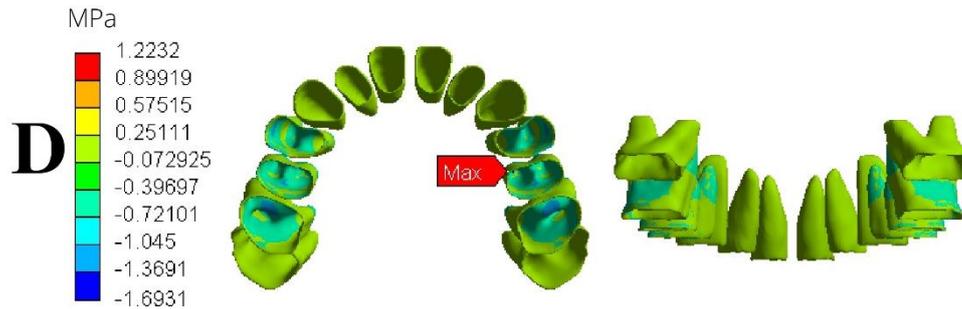
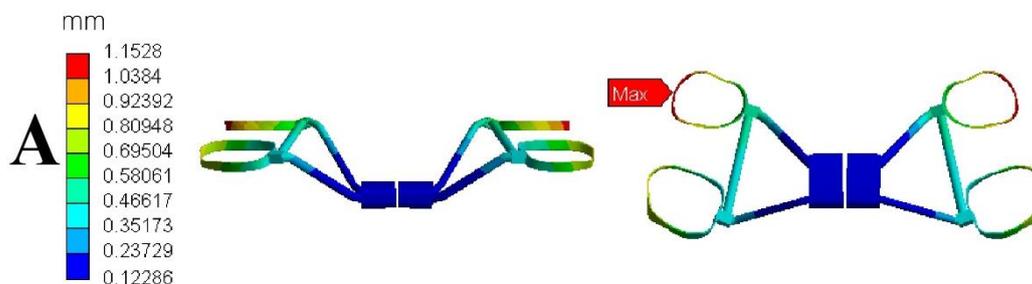


Figura 32. Resultados de los LPD con anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

En la Figura 33A se ve la deformación total del dispositivo hyrax de anclaje dental con un valor máximo de 1.15 mm que se presenta en el anillo del primer premolar, también se evidencia como la deformación se distribuye desde el tornillo disyuntor hasta los anillos sujetadores. Así mismo, en la Figura 33B la deformación unitaria presenta un valor de 0.0031 evidenciándose en el brazo del hyrax del primer molar, además observa el resto de la estructura tiene una deformación similar. En la Figura 33C se muestra el esfuerzo equivalente con un valor de 621.36 MPa ubicado en el brazo que conecta el primer molar con el hyrax, en esta también se observa como los puntos de mayor esfuerzo es en los brazos del tornillo disyuntor. Por último, en la Figura 33D se muestra el esfuerzo máximo principal con un valor de 626.35 MPa en el brazo del primer molar, así mismo se ve como los brazos es donde se presentan los mayores esfuerzos.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

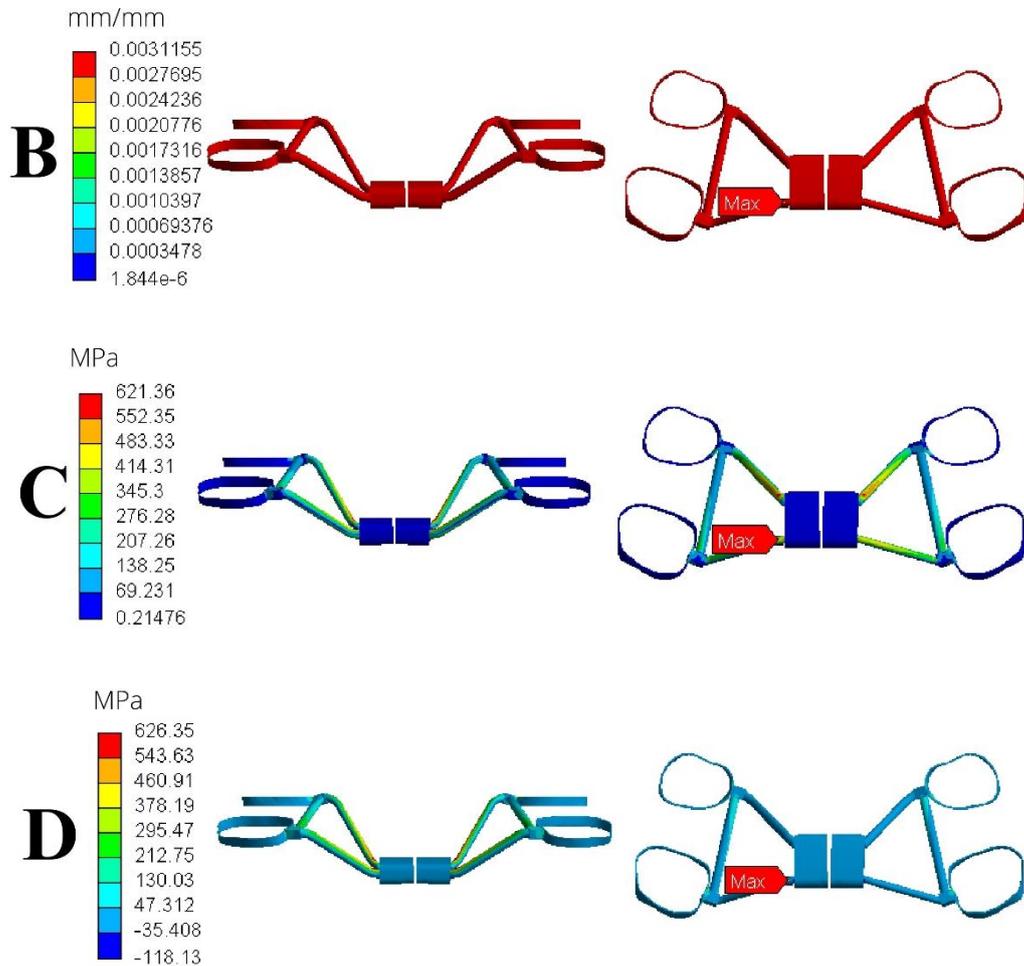


Figura 33. Resultados del hyrax con anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

4.2. EXPANSIÓN CON ANCLAJE ESQUELETICO

Como se ve en la Figura 34A la deformación total del craneo tiene un valor máximo de 0.0097 mm presentándose en la cavidad de los injertos, esta se distribuye desde la zona de la sutura medial palatina hasta el hueso cigomático. En la Figura 34B se evidencia la deformación unitaria y tiene un valor máximo de 0.027 presentándose en la zona de los injertos, además se observa que el resto del cráneo tiene un comportamiento similar. En la Figura 34 C se presenta el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 212.69 MPa ubicándose en la sección de los injertos. Por último, en la Figura 34 D se

muestra el esfuerzo máximo principal que tiene un valor máximo de 211.28 MPa, que también se presenta en la zona de los injertos que sostienen el hyrax con el paladar.

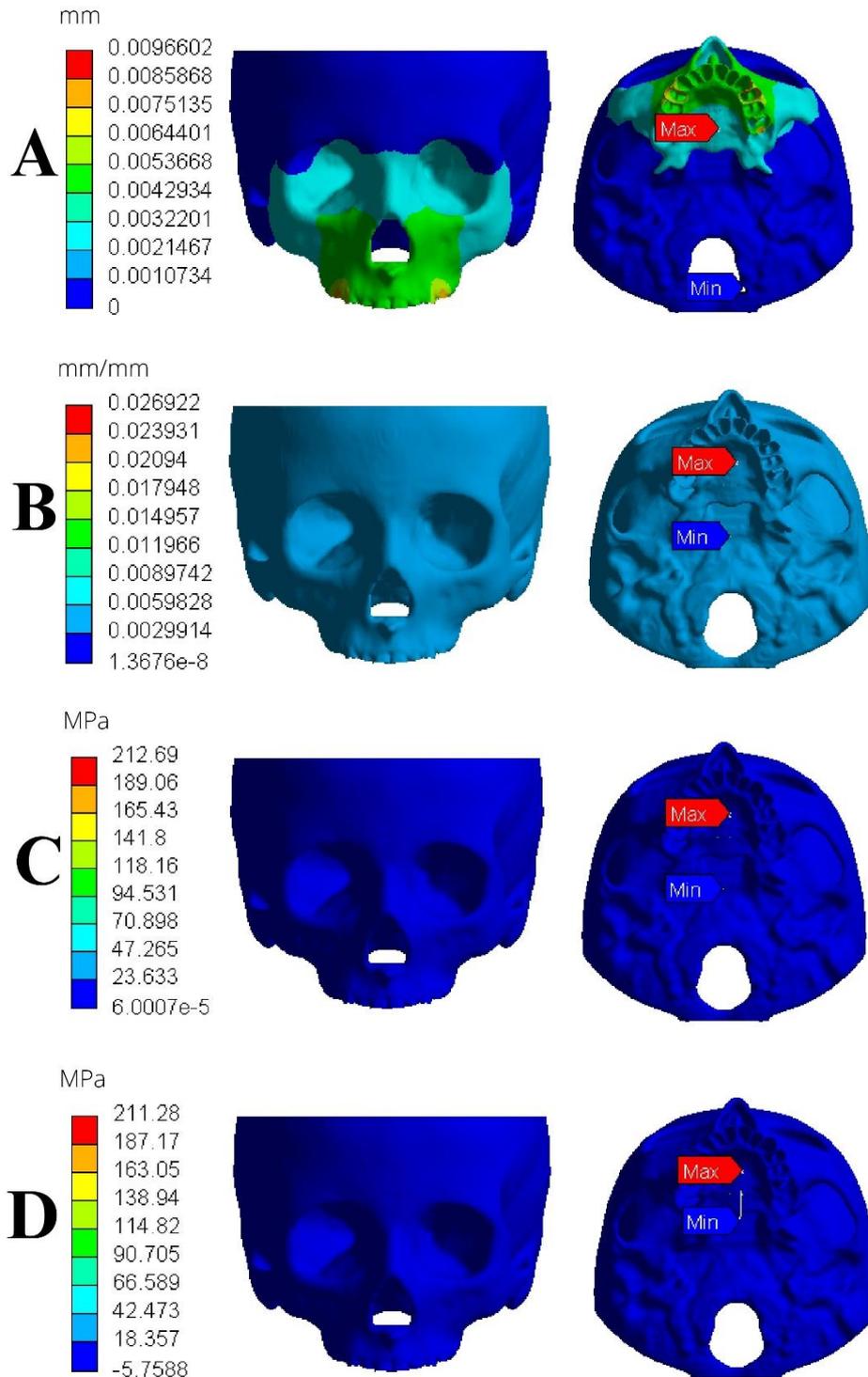
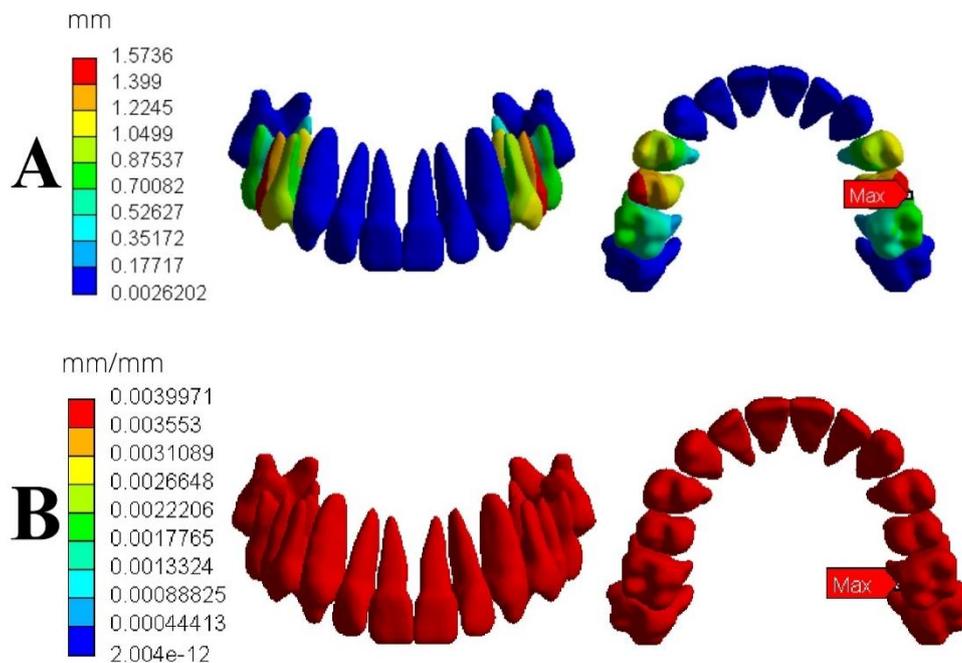


Figura 34. Resultados del cráneo con anclaje dentó - esquelético. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

En la Figura 35A la deformación total de las unidades dentarias tiene un valor máximo de 1.87 mm que se presenta en el segundo premolar, se ve como empieza en la zona lingual del diente y termina en la sección vestibular. Así mismo, en la Figura 35B se muestra la deformación unitaria con un valor máximo de 0.0039 que se presenta en la zona lingual del primer molar, además se observa que el resto de las estructuras se comportan similar. En la Figura 35C se muestra el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 66.95 MPa evidenciándose en la zona lingual del primer molar. Por último, en la Figura 35D está el esfuerzo máximo principal con un valor máximo de 56.57 MPa que también se ve en la sección lingual del primer molar.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

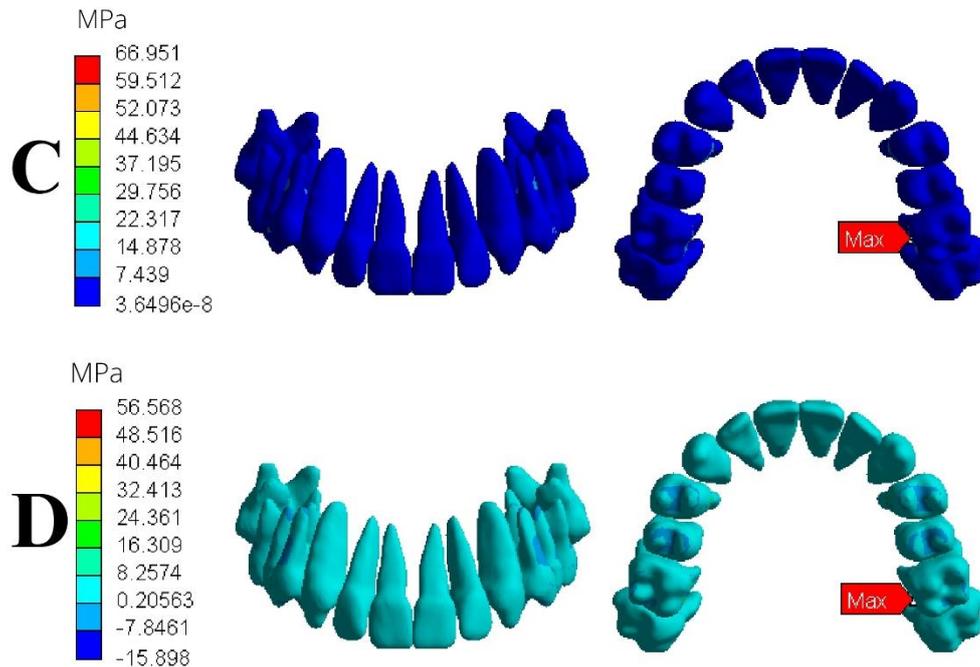


Figura 35. Resultados de los dientes con anclaje dentó - esquelético. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

Como se ve en la Figura 36A la deformación total en los ligamentos tiene un valor de 1.57 mm presentándose en la zona interna del ligamento periodontal del segundo premolar, también se evidencia como la deformación comienza en la zona lingual y termina en la sección vestibular. En la Figura 36B se muestra la deformación unitaria con un valor máximo de 7.53 mostrándose en la raíz izquierda del segundo premolar, además se ve como la deformación se distribuye en la parte interior de los ligamentos ligeramente en la exterior. En la Figura 36C se presenta el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 1.51 MPa viéndose en la corona izquierda del segundo premolar, también se observa como los demás ligamentos se comportan de forma similar. Por último, en la Figura 36D está el esfuerzo máximo principal con un valor máximo de 1.28 MPa mostrándose en el segundo premolar y así mismo se ve como el esfuerzo se distribuye en las coronas de los ligamentos periodontales del primer y segundo premolar, y primer molar.

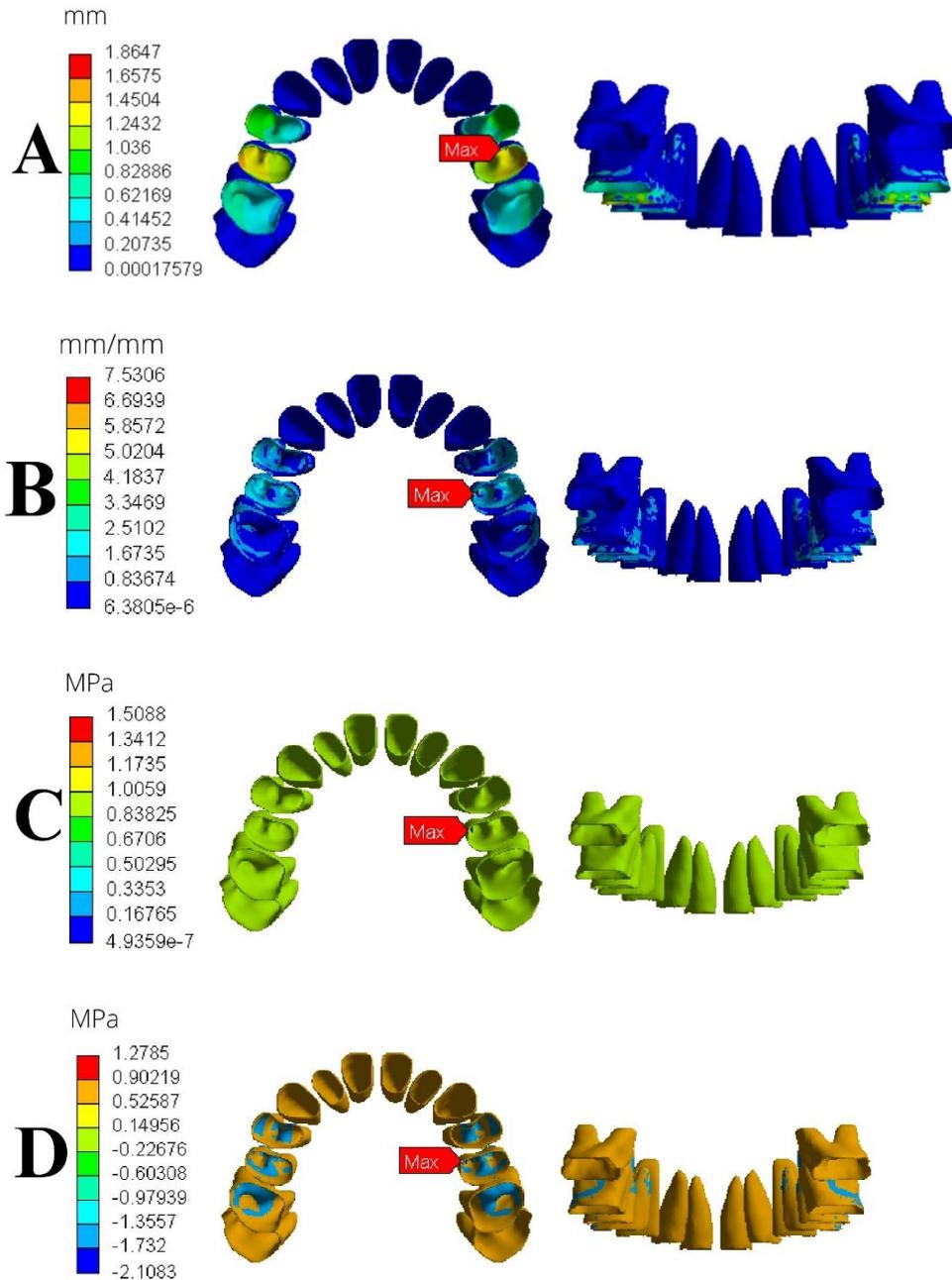
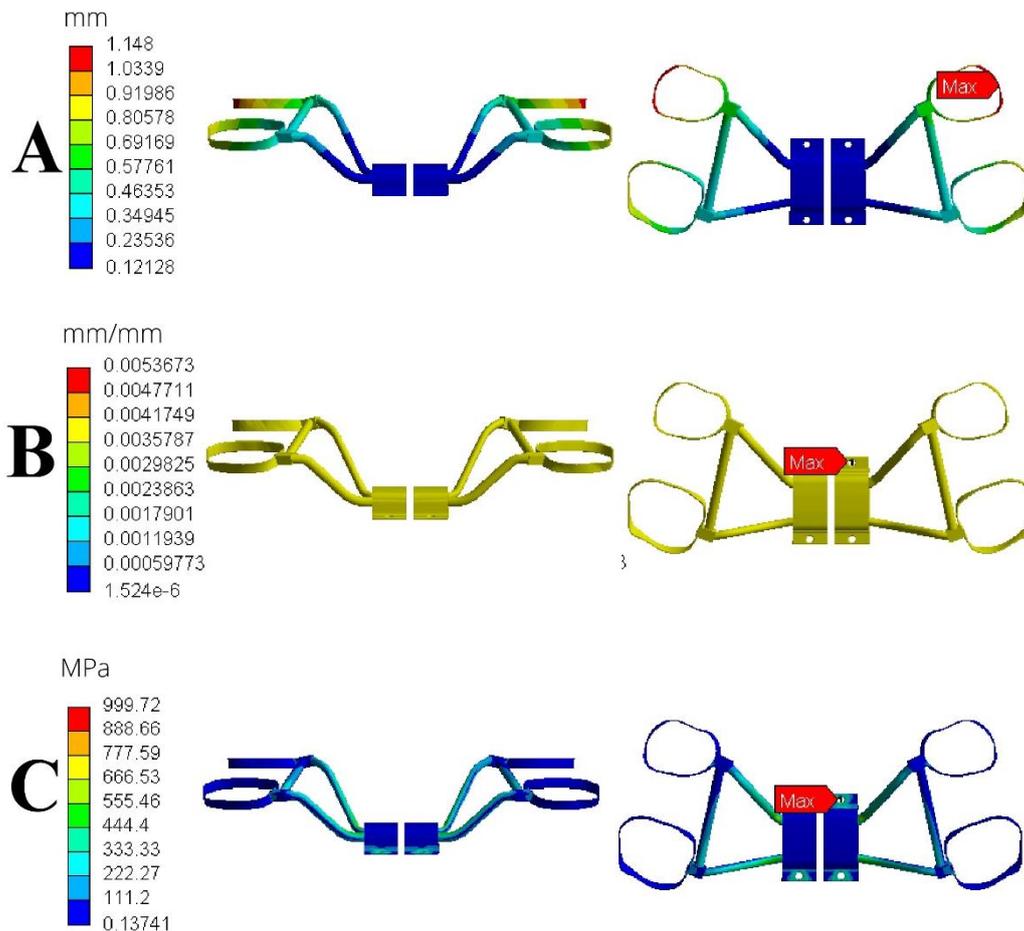


Figura 36. Resultados de los LPD con anclaje dentó - esquelético. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

Como se evidencia en la Figura 37A la deformación total del dispositivo hyrax con anclaje esquelético tiene un valor máximo de 1.15 mm presentándose en el anillo que une el primer molar con el hyrax, además se ve como la deformación comienza en el centro y termina en los anillos del tornillo disyuntor. En la Figura 37B se muestra la

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

deformación unitaria con un valor máximo de 0.0053, ubicada en la cavidad superior donde se sujeta el injerto, el resto del dispositivo tiene una deformación similar. En la Figura 37C se evidencia el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 999.72 MPa viéndose en la cavidad del injerto, además se observa como el esfuerzo comienza desde zona del injerto y se va distribuyendo por los brazos de tornillo disyuntor hasta llegar a los anillos de sujeción. Por último, en la Figura 37D se muestra el esfuerzo máximo principal con un valor de 1346.8 MPa presentándose donde se sujeta el injerto superior y el esfuerzo comienza en la zona central del tornillo y termina en el anillo de sujeción.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

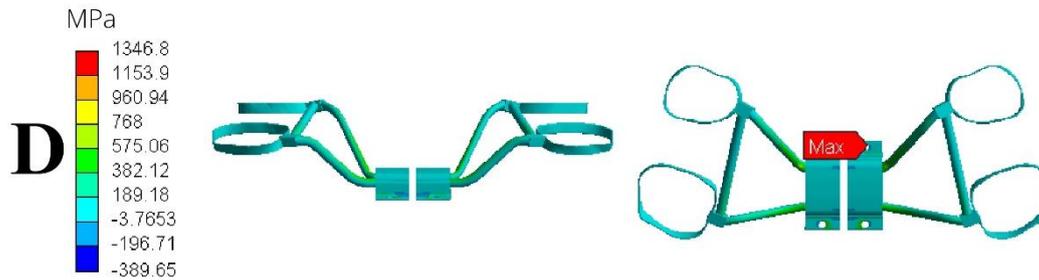


Figura 37. Resultados del hyrax con anclaje dentó - esquelético. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

4.3. EXPANSION CON VARIACIÓN DEL ANCLAJE DENTAL

Como se ve en la Figura 38A la deformación total en el craneo tiene un valor de 0.013 mm que se concentra en la arcada dental del segundo molar, además se observa como la deformación comienza en la sutura medial palatina y termina en el hueso cigomático. En la Figura 38B se evidencia la deformación unitaria con un valor de 0.0010 viéndose en la cavidad del primer molar, también se muestra como la deformación es uniforme en el resto del cráneo. En la Figura 38C se presenta el esfuerzo equivalente con un valor de 12.37 MPa viéndose en el primer molar, así mismo se ve como la deformación se distribuye en toda la cavidad del diente. Por último, en la Figura 38D se muestra el esfuerzo máximo principal con un valor de 12.90 MPa , este se evidencia en el segundo premolar, también se ve como en la zona del parietal, foramen mágnum y hueso cigomático se distribuye el esfuerzo.

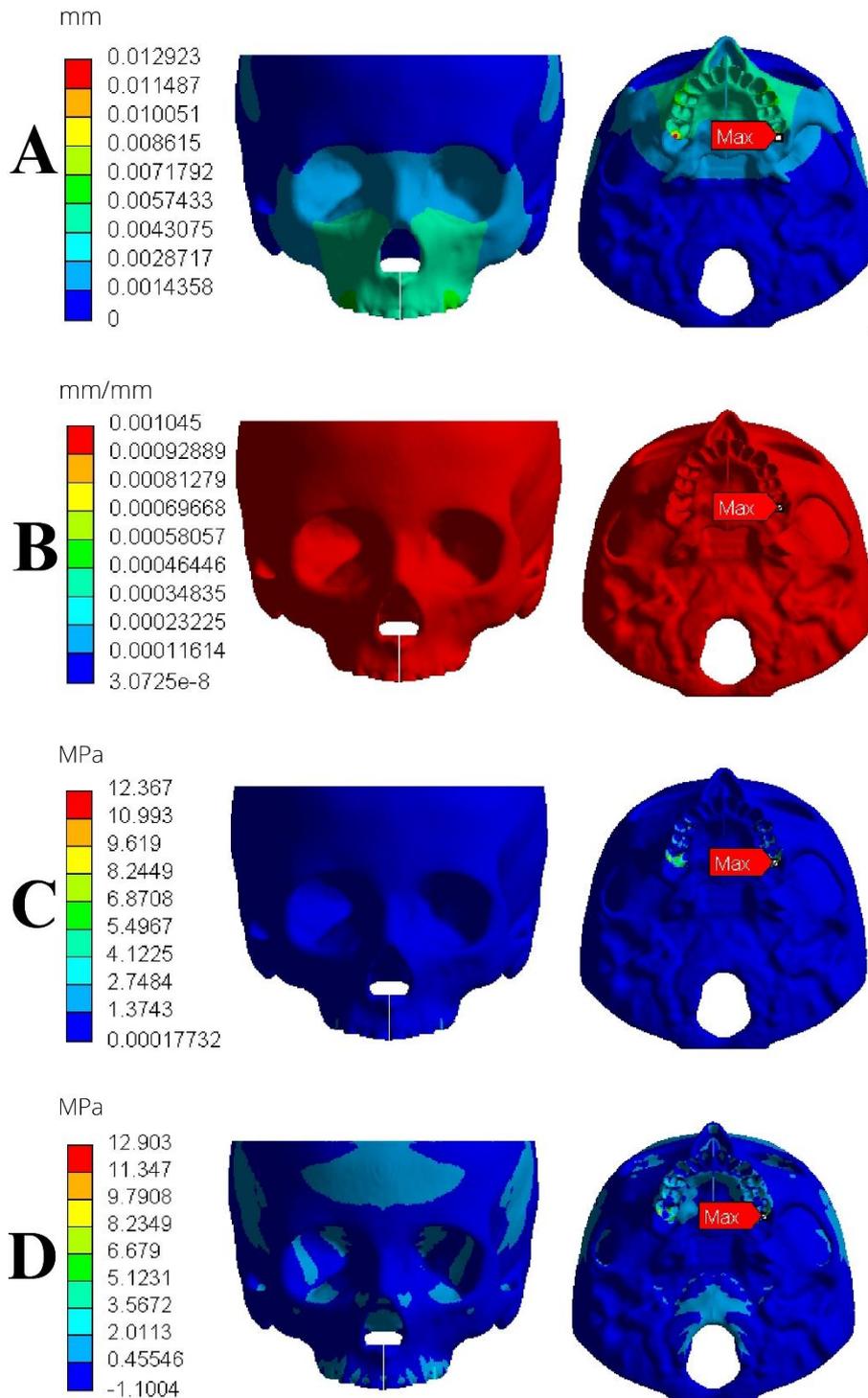
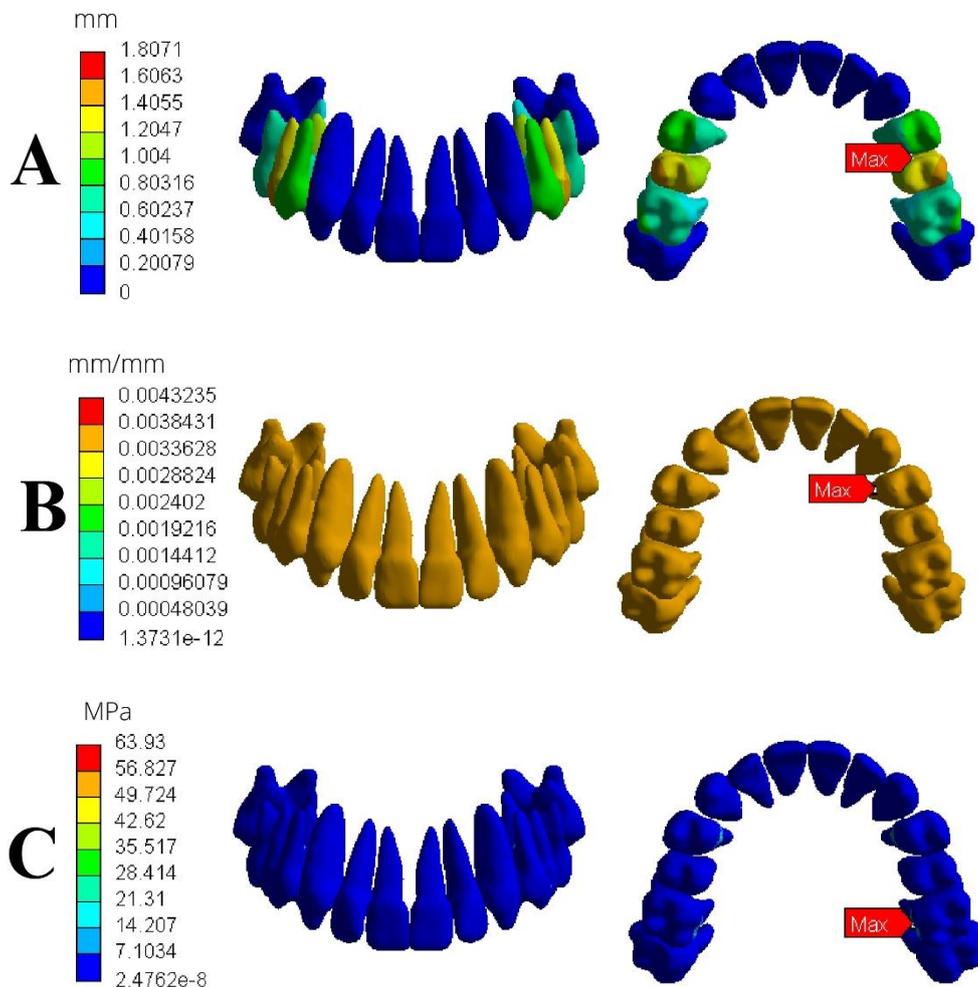


Figura 38. Resultados del cráneo con la variación del anclaje dental. A) deformación total, B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

Como se muestra en la Figura 39A la deformación total en los dientes tiene un valor máximo de 1.81 mm presentándose en el segundo premolar, también se ve como la

deformación va desde la zona lingual hasta la parte vestibular de los dientes. En la Figura 39B se presenta la deformación unitaria con un valor de 0.0043 ubicándose en el primer premolar y esta va desde la zona lingual hasta la vestibular. En la Figura 39C se muestra el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 63.93 MPa evidenciándose en el primer molar, más en concreto en la zona lingual donde se conecta el diente al anillo sujetador del hyrax. Por último, en la Figura 39D se presenta el esfuerzo máximo principal con un valor de 110.7 MPa, concentrándose en la zona lingual del primer premolar.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

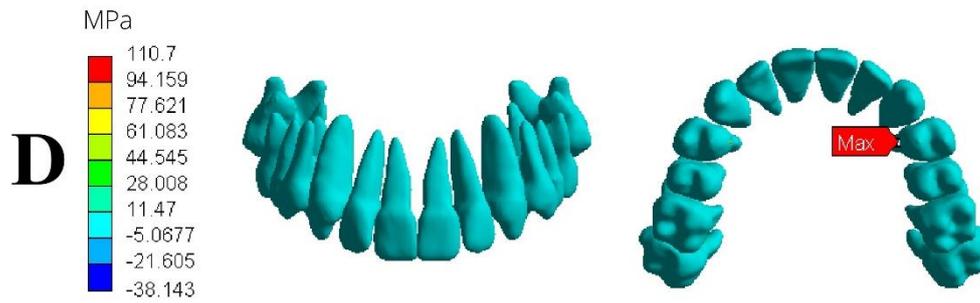
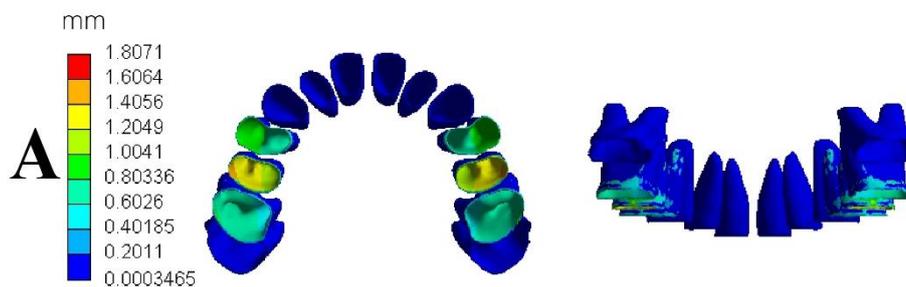


Figura 39. Resultados de los dientes con la variación del anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

Como se muestra en la Figura 40A la deformación total máxima en los ligamentos tiene un valor de 1.81 mm presentándose en la zona interna del ligamento periodontal del segundo premolar, y va desde la zona lingual hasta la vestibular. En la Figura 40B se ve la deformación unitaria con un valor máximo de 7.33 viéndose en la zona interna del segundo premolar y esta va distribuyéndose desde la zona interior hasta la sección externa del LPD. En la Figura 40C se evidencia el esfuerzo equivalente con un valor máximo de 1.47 MPa, además se ve como el esfuerzo es similar en cada uno de los tejidos. Por último, en la Figura 40D se presenta el esfuerzo máximo principal con un valor de 1.24 MPa presentándose en el segundo premolar, además se muestra como las zonas de mayor esfuerzo son las zonas linguales de los LPD.



	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

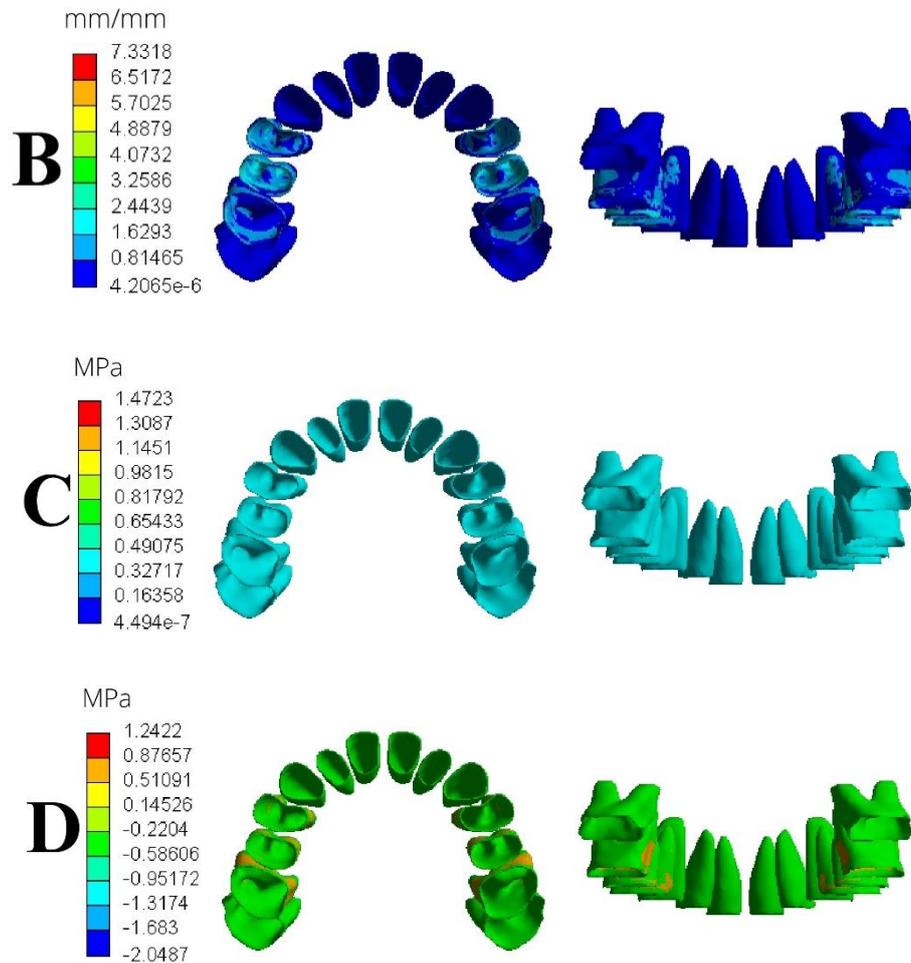


Figura 40. Resultados de los LPD con la variación del anclaje dental. A) deformación total. B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

Como se observa en la Figura 41A la deformación total máxima del disyuntor con variación de anclaje dental es de 0.98 mm presentándose en el anillo sujetador del primer premolar, además se ve como la deformación va desde la zona central del dispositivo hasta la zona más externa. En la Figura 41B se evidencia la deformación unitaria con un valor de 0.0052 ubicándose en el cubo que une el brazo del hyrax con el anillo sujetador, además todo el dispositivo tiene una deformación uniforme. En la Figura 41C se evidencia el esfuerzo equivalente con un valor de 895.07 MPa concentrándose en la pieza que une el brazo con el anillo sujetador del primer molar, además se ve que el esfuerzo se distribuye desde el tornillo disyuntor hacia los brazos. Por último, en la Figura

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

41D se muestra el esfuerzo máximo principal con un valor de 1011.8 MPa evidenciándose en el anillo sujetador del primer molar.

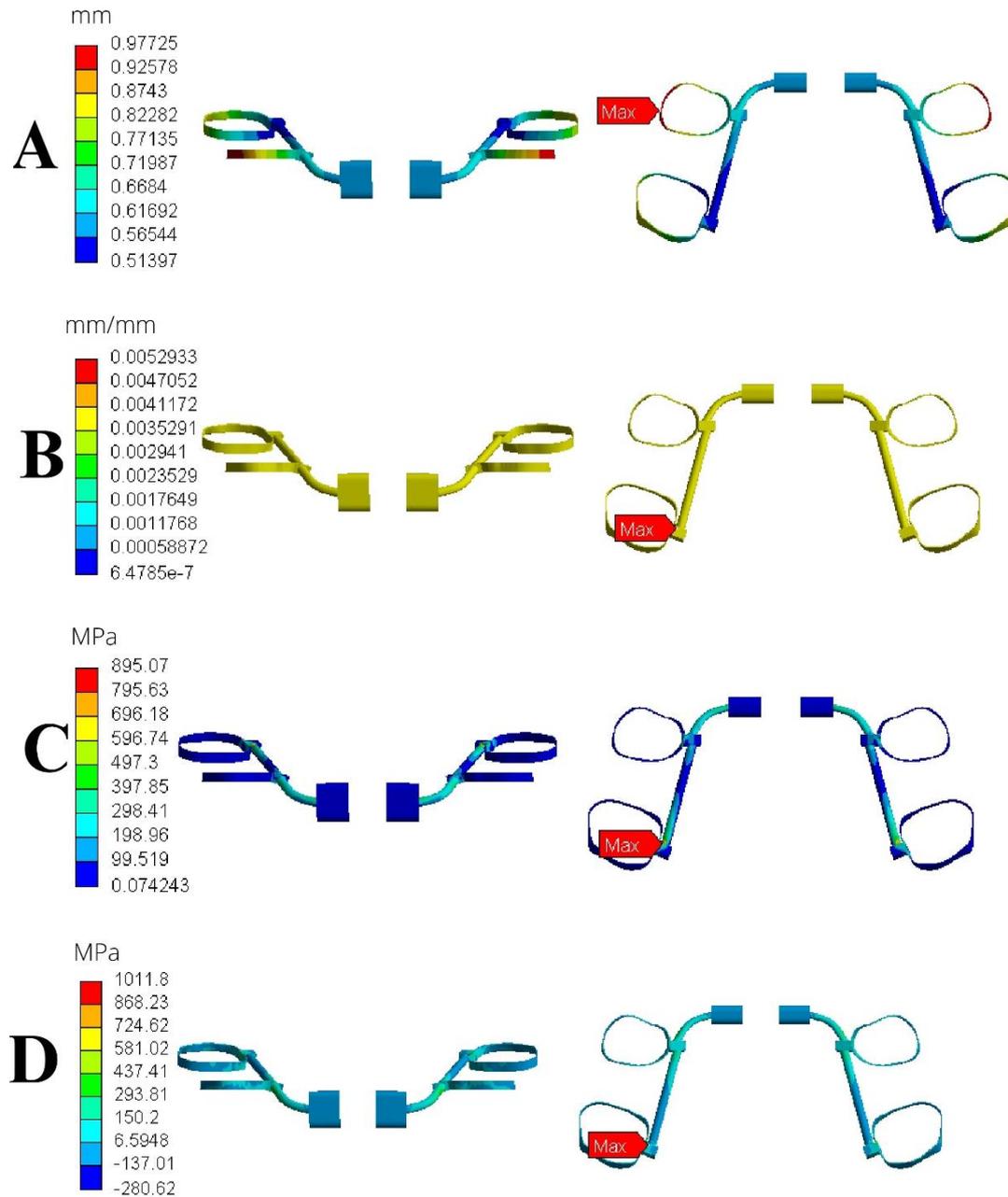


Figura 41. Resultados del hyrax con la variación del anclaje dental. A) deformación total, B) deformación unitaria, C) esfuerzo equivalente von Mises, D) esfuerzo máximo principal.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 5

5. DISCUSIÓN

A continuación, se presenta la validación y comparación de los modelos analizados en esta investigación, cuando son sometidos a cargas de oclusión y de expansión rápida de maxilar. Luego de esto, se hará el debate de los resultados más relevantes obtenidos y se darán posibles explicaciones al comportamiento de los tejidos.

La verificación de los modelos de la presente investigación se realizará utilizando las condiciones de frontera de otras investigaciones, con el fin de demostrar que los tejidos modelados tienen un comportamiento coherente con otros proyectos. Por otro lado, para la comparación se tuvo en cuenta artículos científicos que incluyan el ligamento periodontal ya sea con propiedades líneas o no lineales. El análisis de estas variables se hizo de forma cualitativa y cuantitativa, basándose en las imágenes donde se muestra la distribución de los tejidos involucrados en la actual investigación.

5.1.VALIDACIÓN CON LA LITERATURA

5.1.1. VALIDACIÓN DE LOS LIGAMENTOS PERIODONTALES

Para la validación de este tejido, se utilizó el estudio realizado por Provaditis *et. al.* (2007), donde analizaron el comportamiento de las estructuras craneofaciales durante el tratamiento de expansión rápida de maxilar. Las propiedades mecánicas de los materiales las tomaron como lineales, homogéneas e isotrópicas. Estos investigadores, únicamente analizaron el comportamiento de los ligamentos correspondientes al primer premolar y molar. Para simular la expansión rápida de maxilar usaron desplazamientos correspondientes a 30 pasos, es decir 7.5 mm de activación en toda la sección transversal de la zona bucal, por lo cual son 3.75mm hacia cada lado. En la Figura 42 se presentan los resultados obtenidos.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

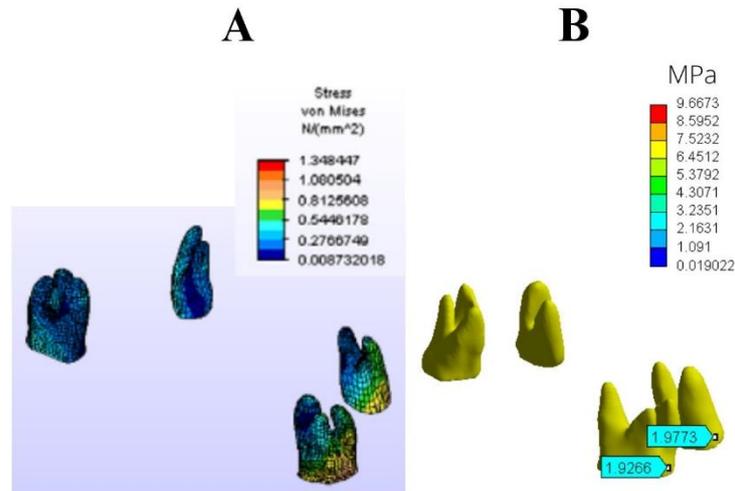


Figura 42. Validación del esfuerzo equivalente von Mises en el LPD del primer premolar y molar. A) imagen adaptada de Provatidis, *et. al.* (2007, pág. 577) y B) Imagen de la presente investigación.

En la Figura 42A, se muestra el resultado del esfuerzo von Mises obtenido en la investigación de Porvatidis *et. al.* (2007), encontraron un valor máximo de 1.3484 MPa, el cual se observa en la parte vestibular de los dos ligamentos. En la Figura 42B, se evidencia los resultados de la presente investigación, obteniendo un valor máximo de 9.6673 MPa, aun así, al revisar la colorimetría de la figura se encuentra un valor de 6.4512 MPa, a pesar de ello, este no es el valor predominante, ya que en la mayoría del tejido se encuentra en un rango de 0.019 MPa hasta 3.05 MPa. Ya que, en esta no se muestra una correcta distribución del esfuerzo, se tomaron las dos ubicaciones donde se presentan los valores máximos en el tejido de la Figura 42A. Al hacer este proceso, se evidencian valores de 1.9266 MPa en el primer molar y de 1.9773 MPa en el primer premolar. Si se hace una comparación de la zona crítica de cada uno de los tejidos se denota similitud entre los valores del esfuerzo, la diferencia entre valores máximos puede deberse, a que en la actual investigación no se tiene un espesor uniforme del ligamento periodontal, lo que puede ocasionar que este se concentre donde el espesor sea menor, generando valores más altos.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

5.2.COMPARACIÓN DEL MODELO

5.2.1. CON MODELO LINEAL

Se compararon los resultados obtenidos del esfuerzo máximo principal, con los tres modelos realizados por Guerrero *et. al.* (2019). En esta investigación se construyeron tres tipos de expansores, donde las condiciones de frontera para los tres fueron: cargas de masticación de 70 N sobre la parte oclusal de los premolares y el primer molar del maxilar, un desplazamiento de 0.125 mm ubicado en el dispositivo de expansión, soporte fijo en las caras posteriores del modelo y una restricción en el eje z aplicada en el parietal. Por otro lado, en los tres modelos el cráneo y dientes hacen parte de una sola estructura, los materiales tienen propiedades isotrópicas, homogéneas y lineales.

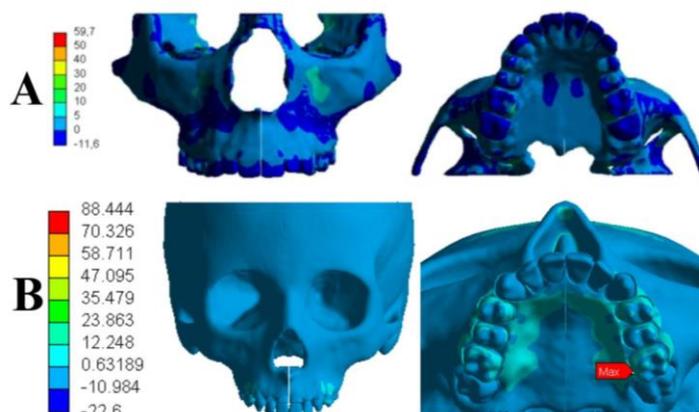


Figura 43. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con el expansor con anclaje dental. A) imagen adaptada de Guerrero Vargas, *et. al.* (2019, pág. 197) y B) Imagen de la presente investigación.

En la Figura 43 se observa la comparación entre los modelos con anclaje dental, se observa que el esfuerzo máximo se presenta en la zona lingual del primer molar y premolar, esto se debe a que en este lugar es donde se ancla el dispositivo de expansión a los dientes. La investigación con la que se está comparando tiene un valor máximo de 59.7 MPa y en la actual un valor de 88.444 MPa. Si bien los valores son diferentes, esto puede suceder debido a que en el presente estudio cada una de las estructuras del cráneo están por separado, además de las diferencias en la anatomía entre los modelos.

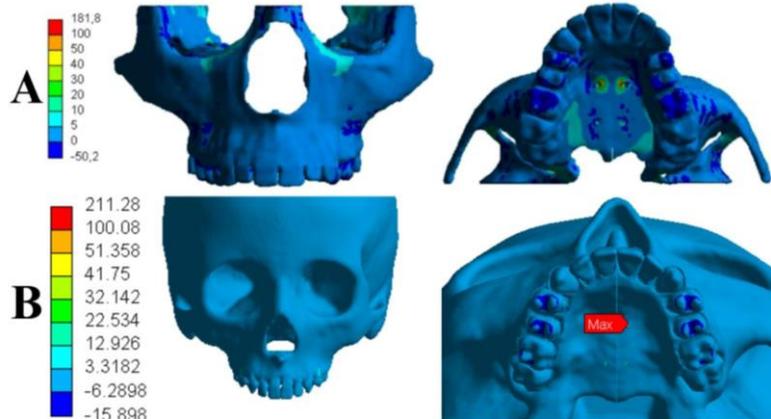


Figura 44. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con el expansor con anclaje esquelético. A) imagen adaptada de Guerrero Vargas, et. al. (2019, pág. 197) y B) Imagen de la presente investigación.

En la Figura 44, se muestra la comparación de los modelos con anclaje dentó-esquelético. Al observar la distribución de esfuerzo en los estudios se evidencia una concentración de carga en la sección del paladar, específicamente en la parte donde se fija el dispositivo de expansión al cráneo. En la investigación de comparación hay un valor máximo de 181.8 MPa que se refleja en la zona exterior del injerto anterior, por otro lado, en el actual trabajo se presenta en la zona interna del mismo injerto con un valor de 211.28 MPa. De lo anterior se puede decir que los injertos son los más críticos en todo el modelo, debido a que están muy cerca de donde se genera el desplazamiento de la expansión y no pueden moverse, esto podría ocasionar que se concentre mayor esfuerzo en la sutura medial palatina

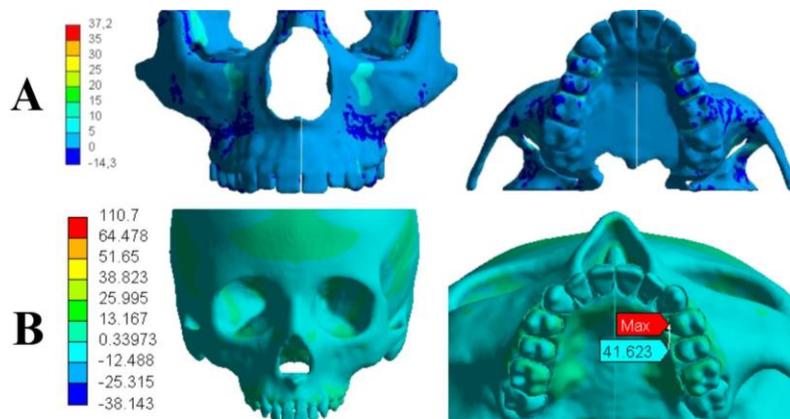


Figura 45. Comparación del esfuerzo máximo principal en el cráneo, con la variación del expansor con anclaje dental. A) imagen adaptada de Guerrero Vargas, et. al. (2019, pág. 197) y B) Imagen de la presente investigación.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

En la Figura 45 se observa la comparación entre modelos con la variación del anclaje dental. En esta se evidencia que, en los dos estudios, el esfuerzo máximo se presenta en la cara lingual del primer premolar y en la zona media entre el segundo premolar y el primer molar. La investigación con la que se comparación tiene un valor máximo de $37.2 MPa$ y en el presente trabajo un valor de $110.7 MPa$. Este número se da en un solo punto, por lo cual es un concentrador de esfuerzo generado por el diseño del disyuntor y la forma en que se aplica la carga, ya que al ser geometrías no uniformes el esfuerzo no se distribuye homogéneamente por los nodos del tejido. Lo anterior se demuestra debido a que, si se analiza la zona aledaña a este punto se encuentran valores alrededor de $41.623 MPa$. Si se comparan los dos modelos se evidencia que tienen un comportamiento parecido, ya que el mayor esfuerzo se da en las mismas partes anatómicas, con valores cercanos.

Con las comparaciones anteriormente realizadas se puede deducir que los modelos se comportan de forma similar en ambas investigaciones, que las diferencias entre valores pueden deberse a que en esta investigación se construyeron modelos con cada uno de los elementos por separado. Así mismo, al ligamento periodontal se definió con las propiedades de un material viscoelástico con el fin de asemejar en mayor medida los modelos diseñados, a la realidad.

5.2.2. COMPARACIÓN DE DEFORMACIONES

La deformación total obtenida en el cráneo con anclaje dental se comparó con respecto al modelo 4 de la investigación realizada por Chaves Fernández *et. al.* (2021). En esta investigación crearon 6 modelos diferentes con el fin de conocer el desplazamiento en los dientes dependiendo de la posición en la que se ubica el dispositivo de expansión. Para esto, utilizaron desplazamientos de 0.5 mm ubicados en el centro del tornillo. En la Figura

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

46 y Figura 47, se observan los resultados obtenidos en ambas investigaciones para los desplazamientos.

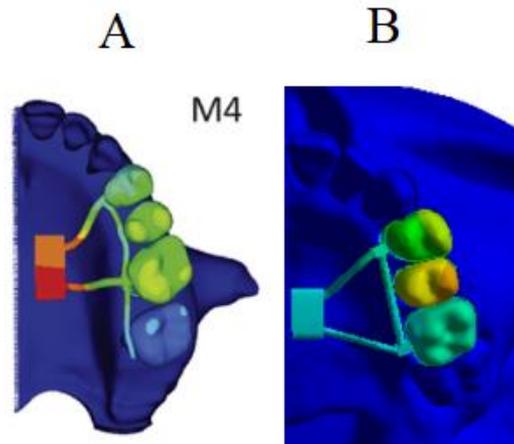


Figura 46. Comparación de la distribución de la deformación total en el modelo con dispositivo de expansión con anclaje dental. A) imagen adaptada de (Chaves Fernandes, et. al. (2021, pág. 269) y B) Imagen de la presente investigación.

En Figura 46, se evidencia que en las dos investigaciones la deformación total comienza desde el centro del paladar hacia la zona exterior del cráneo, también, se ve que la gama de colores son diferentes pero las tendencias ocasionadas por la carga se distribuyen de manera similar en el primer, segundo premolar y en el primer molar, por último, se observa que la fuerza no genera deformaciones en ninguna de las otras piezas dentarias. La diferencia radica en que la investigación de Chaves Fernandes *et. al.* (2021) la deformación máxima ocurre en el hyrax mientras que en el presente estudio ocurre en la zona vestibular del segundo premolar. Esto puede ser ya que en los modelos de la actual investigación se incluyen los LPD con propiedades de un material viscoelástico, lo que puede ocasionar que las deformaciones se concentren en estos tejidos aumentando considerablemente la deformación.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

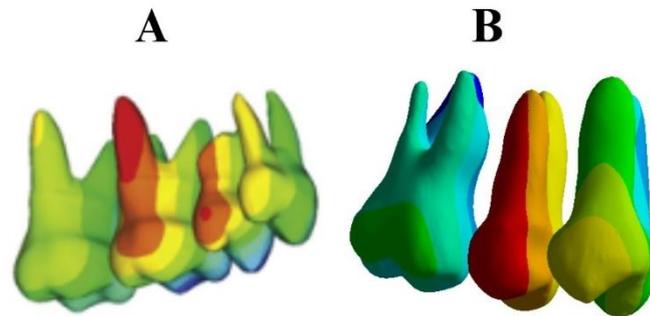


Figura 47. Comparación de la distribución de la deformación total en los dientes con dispositivo de expansión con anclaje dental. A) imagen adaptada de (Chaves Fernandes, et. al. (2021, pág. 270) y B) Imagen de la presente investigación.

En la Figura 47, se observa que la deformación tiene una distribución similar en los dos modelos, presentado la deformación máxima en la cara vestibular del segundo premolar, que va desde la raíz del diente hacia la corona de este. Así mismo, se evidencia que la pieza dentaria que menos sufre deformación es el primer molar. La similitud en la distribución puede deberse a la posición en la que están ubicados los dispositivos de expansión en ambas investigaciones.

Las comparaciones de la distribución de las deformaciones mostradas anteriormente, permiten demostrar que, a pesar de que los modelos hechos en la presente investigación tienen valores con rangos desde 0 *mm* hasta 1.8071 *mm*, la deformación se distribuye y se presenta de manera similar en las estructuras cráneo maxilares. Por tal motivo, se puede decir que los diseños construidos son válidos para utilizarse en la investigación del comportamiento del ligamento periodontal durante una expansión rápida de maxilar. La diferencia de valores entre estudios puede deberse a que, al tomar los ligamentos periodontales con propiedades de un material viscoelástico, la deformación ya no se concentra en la activación del dispositivo disyuntor sino en los ligamentos, ocasionando que los valores se eleven y su punto máximo cambie de tejido.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

5.2.3. COMPORTAMIENTO DE LOS TRES MODELOS

En la presente investigación se estudió la respuesta biomecánica de los ligamentos periodontales durante la expansión rápida de maxilar. Los tres modelos están compuestos por estructuras independientes, estos son, los dientes, el cráneo, los ligamentos periodontales y tres tipos de dispositivos de expansión. Para el análisis biomecánico se consideraron cargas de 70 N sobre el plano oclusal del primer premolar, segundo premolar y primer molar, además se tomó un desplazamiento de 0.125 mm que da cuenta a un cuarto de vuelta de un tornillo disyuntor, este se ubicó sobre el dispositivo de expansión.

En los resultados de esfuerzo equivalente von Mises, se evidencio un rango de valores que van desde 0,0742 MPa a 999,72 MPa en los dispositivos de expansión, esto puede deberse a que los hyrax son los que crean la fuerza y al tener oposición tienen que soportar mayores esfuerzos. Aun así, como tienen propiedades de un material lineal solo se puede evidenciar que las condiciones de frontera utilizadas ocasionan que se sobrepase el límite elástico del material generando deformaciones permanentes.

Al analizar el funcionamiento de los tres modelos, se encontró que el anclaje dental concentra en mayor medida los desplazamientos en el primer premolar y molar, actuando de manera uniforme, sobre estas dos piezas dentarias. En el modelo con anclaje dentó-esquelético se evidencio que los desplazamientos ocurren en mayor medida sobre la sutura medial palatina. Por último, el desplazamiento en la variación del anclaje dental se presentó sobre el primer premolar y molar, a pesar de esto, no se presentó de manera uniforme ya que se concentraba más en el primer premolar. Se puede deducir que el anclaje con mayor eficiencia para realizar una expansión rápida de maxilar es el dentó-esquelético, dado que produce mayores desplazamientos en la sutura medial palatina, sin

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

embargo, es el que mayor esfuerzo genera sobre el tejido. Por otro lado, el anclaje dental es el más equilibrado, ya que no genera esfuerzos excesivos sobre los tejidos y actúa de manera uniforme sobre el primer premolar y molar.

Así mismo, se evidencio que, en los modelos con anclaje solamente dental, los dientes presentan las deformaciones más altas, comenzando en las caras linguales y finalizando en las caras vestibulares, mostrando la deformación máxima en el segundo premolar. Esta puede ser la razón por la cual, cuando se realiza una expansión rápida de maxilar, se tuercen los dientes a los que se sujeta el dispositivo de expansión.

En los resultados se observa que, en el modelo con anclaje esquelético, el ligamento periodontal tiene el esfuerzo máximo en la raíz del segundo premolar, también se ve que la distribución es uniforme en los tres ligamentos y comienza en la zona lingual hasta la vestibular, esto se debe a que la carga actúa de la misma forma en ambos dientes y de esta manera se transmite al resto de tejidos. En el de anclaje dentó-esquelético se evidencia que el esfuerzo máximo está en la raíz del segundo premolar, así mismo se percibe que la carga comienza a actuar en la parte lingual de las raíces y termina en la zona vestibular del tejido, ya que hay un mayor soporte en la sutura medial palatina que en los anclajes de los dientes. Por último, en la variación del anclaje dental el esfuerzo máximo se da en la raíz del segundo premolar, en este, la carga se concentra en la zona lingual del primer molar y termina en la parte vestibular, puesto que la fuerza no actúa uniformemente en los tejidos.

Una posible explicación del porqué los esfuerzos máximos ocurren en la raíz del segundo premolar, es que el espesor de los ligamentos no es el mismo a lo largo de toda la estructura, generando que haya puntos donde se concentre el esfuerzo, y por lo tanto se presenten valores por encima de lo esperado. Así mismo, al analizar el comportamiento

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

del esfuerzo ocasionado en los ligamentos periodontales, se aprecia que la función de este tejido es servir de amortiguador para las cargas que genera el hyrax, además es el encargado de distribuir la carga para que no se concentre en un solo punto y rompa la unidad dentaria. Esto se observa en los resultados mostrados en la sección anterior, donde se ve que los LPD reciben la carga que transmite el dispositivo de expansión a la zona lingual del diente. Los ligamentos hacen que esta se distribuya por toda la estructura, comenzado por las raíces y terminando en el maxilar.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En esta investigación, se analizó el comportamiento del ligamento periodontal durante una expansión rápida de maxilar con tres dispositivos de expansión diferentes, esto se hizo por medio del método de elementos finitos. Con las comparaciones hechas, se puede concluir que los diseños creados en la presente investigación están dentro de los parámetros para estudiar el fenómeno de la ERM. Al analizar los resultados obtenidos, se puede encontrar que los tres dispositivos van a ocasionar la mayor deformación y esfuerzo en la cara vestibular del ligamento perteneciente al segundo premolar. Además, se puede deducir que el dispositivo que genera mayores esfuerzos y deformaciones en el LPD es el de anclaje dentó-esquelético, por otro lado, el que menos afecta el ligamento periodontal es el anclaje dental convencional.

También, se puede concluir que el dispositivo que mayor eficiencia tiene para expandir la sutura medial palatina es el de anclaje dentó-esquelético, sin embargo, también es el que mayores deformaciones y esfuerzos en el tejido. Así mismo, el aparato que distribuye más uniforme las fuerzas y desplazamientos en todas las estructuras es el hyrax con anclaje dental, aun así, la ERM podría tardar más tiempo ya que este concentra los esfuerzos en los dientes, teniendo el efecto secundario de torcer las piezas dentarias a los que está anclado. Por este motivo, se concluye que este dispositivo de expansión es el más equilibrado en costo beneficio para el paciente. Con relación al hyrax con variación de anclaje dental, se evidencio que este no realiza la expansión rápida de maxilar de manera eficiente ya que, al estar posicionado detrás de los dientes frontales, las fuerzas no actúan uniformemente sobre los dientes, concentrándose en el ligamento periodontal del primer molar.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Por último, al analizar los esfuerzos de los ligamentos periodontales, se concluye que este tejido es el encargado de concentrar las cargas en las raíces del diente, con el fin de evitar que las coronas dentales se fracturen por soportar fuerzas que sobrepasen su límite elástico.

En los trabajos a futuro, se espera implementar un software que permita obtener el espesor del LPD con mayor precisión, para que toda la estructura del ligamento se ajuste más a la realidad. Así mismo, utilizar otro tipo de simulación que logre ejecutar expansiones progresivas, obteniendo una mejor trazabilidad de los resultados. Por otro lado, contar con un computador con mejor procesador, el cual pueda ejecutar el análisis completo del cráneo, sin necesidad de la simetría. Por último, cambiar las propiedades mecánicas del ligamento (viscoelástico, hiperelástico, entre otras) con el fin de obtener resultados más coherentes con el *in vivo*.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ae Han, U., Kim, Y., & Uk Park, J. (2009). Three-dimensional finite element analysis of stress distribution and displacement of the maxilla following surgically assisted rapid maxillary expansion. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, 37, 145-154.
- Anatomia Topografica. (2021). *Mandibula - Maxilar inferior*. Obtenido de <https://anatomiatopografica.com/huesos/mandibula/>
- Ardizzone Garcia, I., Celemin, A., Sánchez, T., & Aneiros, F. (26 de 05 de 2021). *Oclusión fisiológica frente a oclusión patológica. Un enfoque diagnóstico y terapéutico práctico para el odontólogo*. Obtenido de Universidad de Complutense: https://www.gacetadental.com/wp-content/uploads/OLD/pdf/220_CIENCIA_Oclusion_fisiologica_vs_patologica.pdf
- Bastidas, M., Arias, E., & Quiros, O. (2012). Disyunción Maxilar con la utilización del Expansor tipo Hyrax en pacientes con Labio y Paladar Hendidos. *Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría*. Obtenido de <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2012/art-27/>
- Benazzi, S., Nhu Nguyen, H., Kullmer, O., & Kupczik, K. (2016). Dynamic Modelling of Tooth Deformation Using Occlusal Kinematics and Finite Element Analysis. *PloS one.*, 11(3), 1-17.
- Boix, & Morer. (Octubre de 2003). *Propiedades mecánicas de la dentina humana*. Obtenido de [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-12852004000200003#:~:text=.%2C%201996\).-,%20Watanabe%20et%20al.,adhesiva%20utilizando%20el%20mismo%20m%C3%A9todo](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-12852004000200003#:~:text=.%2C%201996).-,%20Watanabe%20et%20al.,adhesiva%20utilizando%20el%20mismo%20m%C3%A9todo)

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Bratos, P. (2019). *Ferrus & Bratos*. Obtenido de Cómo corregir una maloclusión clase III con ortodoncia: <https://www.clinicaferrusbratos.com/mordida/ortodoncia-clase-iii/>

Bratos, P. (abril de 2020). *Ferrus & Bratos*. Obtenido de Qué solución tiene la mordida en tijera: <https://www.clinicaferrusbratos.com/mordida/mordida-tijera/>

Castilla, V. T., & Martínez, B. G. (2015). Manejo ortopédico-ortodóntico con aparato de Hass y Schwartz en paciente con colapso transversal maxilar y mandibular. *Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría*. Obtenido de <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2015/art-19/>

Cavas, F., Nieto, J., Cañavate, F., & Fernández-Pacheco, D. (2016). Design and structural analysis of a prosthesis for an arthroplasty. definition of the osteointegration grade during the rehabilitation process. *International Congress on Project Management and Engineering*, 1180-1192.

Chaves Fernandes, L., Farinazzo Vitral, R. W., Yoshito Noritomi, P., Silva Maximiano, G., & da Silva Campos, M. J. (2021). Influence of the hyrax expander screw position on displacement and stress distribution in teeth: A study with finite elements. *American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics*, 160(2), 266-275.

Cheng, Y., Cheung, W., & Chow, T. (2010). Strain analysis of maxillary complete denture with three-dimensional finite element method. *The Journal of prosthetic dentistry*, 103(5), 309-318.

Cheon Lee, S., Hyun Park, J., Bayome, M., Beom Kim, K., Araujo, E., & Ah Kook, Y. (2014). Effect of bone-borne rapid maxillary expanders with and without surgical

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

assistance on the craniofacial structures using finite element analysis. *American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics*, 145(5), 638-648.

Ciro, P., Sandoval, P., Rey, D., Uribe, G., Sierra, A., & Obeti, G. (2011). Distalización de los Molares Maxilares con Aparatos Intraorales de Nueva Generación que no Necesitan Colaboración del Paciente. *Int. J. Odontostomat*, 39-47.

Clinica dental los Valles. (2020). *Disyuntor McNamara*. Obtenido de <https://www.clinicalosvalles.es/disyuntor-macnamara/>

Cuñaro, M. S. (Marzo de 2010). *Biomecanica de la Mandibula Humana*. Obtenido de <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/70155/>

de Sousa Araugio, R., Landre, J., Almeida Silva, D., Pacheco, W., Melo Pithon, M., & Oliveira, D. (2013). Influence of the expansion screw height on the dental effects of the hyrax expander: A study with finite elements. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*.

Delgado, C., Rosenberg, F., Scheu, J., & Francisca. (27 de Noviembre de 2019). *Expansión rápida del maxilar superior y su impacto a nivel de la vía aérea superior*. Obtenido de <https://docs.bvsalud.org/biblioref/2019/12/1026823/17049-texto-del-articulo-59666-1-10-20191126.pdf>

Dentaurum. (s.f.). *Dentaurum*. Obtenido de Tornillos de expansión.

Dentum. (5 de 08 de 2021). *Malocclusion dental: Qué es, tipos y tratamiento*. Obtenido de Qué es la maloclusión dental: <https://dentum.com.pe/blog/malocclusion-dental-que-es-tipos-y-tratamiento-dentum/>

Diaz del Castillo Rodriguez, F., & Ferrari Mora, D. (2018). *Universidad nacional autónoma de México*. Obtenido de Metodo del elemento finito y AutoFEM:

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m1/Elemento_finito_Autofem.pdf

Espuch Núñez, D., Alañon Fernandez, F. J., & Alañon Fernandez, M. Á. (18 de 05 de 2021). *Correlación anatómica y radiológica en la cirugía lagrimal con láser en cadáver*. (F. d. medicina, Ed.) Obtenido de Universidad de Elche: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/3263/1/TD%20Espuch%20N%C3%BA%C3%B1ez%2C%20Diego.pdf>

Fábregues , S. (2021). *Best Quality Dental Centers*. Obtenido de Ligamento Periodontal: <https://bqdentalscenters.es/periodoncia-encias/ligamento-periodontal/>

Fisioline. (2015). *Hueso Nasal*. Obtenido de <https://www.fisioterapia-online.com/glosario/hueso-nasal>

Florez, A. P., Gallegos, F., & Fierro, C. (Abril de 2020). *Riesgos asociados al uso de Expansión Rápida del Maxilar*. Obtenido de https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-12852020000100003

Fuentes del Campo, A. D., & Maerín Alvarado, M. C. (26 de 05 de 2021). *Índices de asimetría y torque de músculos mandibulares y cervicales en sujetos con y sin interferencia oclusal molar mediotrusiva*. Obtenido de Universidad complutense de Madrid: <https://core.ac.uk/download/pdf/19724129.pdf>

Fuentes Fuentes, M. V. (2004). Propiedades mecánicas de la dentina humana. *Avances en Odontoestomatología*, 20(2).

Galicer Sánchez, M. (20 de 05 de 2021). *Simulación del bruxismo y su efecto en la estructura ósea de la mandíbula*. Obtenido de Obtención del modelo de EF de la mandíbula humana:

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5150/fichero/Cap%C3%ADtulo6_Obtenci%C3%B3n+del+modelo+de+EF+de+la+mand%C3%ADbula+humana.pdf

García Ballesta, C., Pérez Lajarín, L., & Cortés Lillo, O. (2017). Alteraciones radiculares en las lesiones traumáticas del ligamento periodontal: revisión sistemática. *Revista del Ullustre Consejo General de Colegios de Odontólogos y Estomatólogos de España*, 197-208.

García Fernández, A. L., & García García, F. (2021). Maloclusiones dentales. *Ocronos*, 4(8).

Goiato, M. C., Zuim, P. R., & Caxias, F. P. (November de 2017). *Does pain in the masseter and anterior temporal muscles influence maximal bite force?* Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003996917302066>

Gómez de Derraris, M., & Campos Muñoz, A. (2009). *Histología, embriología e ingeniería tisular bucodental*. Paranamericana.

Gómez de las Heras, E. B., & Rodríguez Gómez, F. L. (18 de 05 de 2021). *Estudio comparativo de la dacriocistorrinostomía endoscópica nasal frente a la dacriocistorrinostomía transcanalicular con laser de diodo en el tratamiento de la obstrucción nasolagrimal*. Obtenido de Universidad complutense de Madrid: <https://eprints.ucm.es/id/eprint/41136/1/T38353.pdf>

Gonzalez, F. (2018). *Que es una maloclusion dental*. Obtenido de <https://proxidental.es/blog/que-es-una-maloclusion-dental>

Gram dent. (2017). *Gram dent*. Obtenido de Maloclusiones Dentarias.

Gross, M., Arbel, G., & HersHKovitz, I. (2001). Three-dimensional finite element analysis of the facial skeleton on simulated occlusal loading. *Journal of Oral Rehabilitation*, 684-694.

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Gualán Caruche, L. P., Sigüencia Cruz, V., & Bravo Calderón, M. E. (2015). Malocclusion de clase III, tratamiento ortodoncico. Revisión de la literatura. *Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría*.

Guerrero Vargas, J. A. (2019). *Repositorio UNAL*. Obtenido de Biomechanical and mechanobiological model of the midpalatal suture formation process, by computational simulation: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77286>

Guerrero Vargas, J., Macari, S., Silva, T., de las Casas, E., & Garzon Alvarado, D. (2019). Influence of interdigitation and expander type in the mechanical response of the midpalatal suture during maxillary expansion. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 195-209.

Guzmán Martínez, L. M., & Aristizabal Mulett, M. C. (2020). *Universidad autónoma de manizalez. (UAM)*. Obtenido de Efectos sobre el ligamneto periodontal durante la expansión de maxilar, mediante el uso de alineadores termoformados con y sin la utilizacion de aditamentos en resina evaluado en un modelo de elementos finitos.: http://repositorio.autonoma.edu.co/bitstream/11182/1157/1/Efectos_sobre_ligamento_periodontal_durante_expansi%C3%B3n_maxilar_mediante_uso_alineadores_termoformados_con_sin_utilizaci%C3%B3n_aditamentos_resina_evaluado_modelo_elementos_finitos.pdf

Hyun Park, J., Bayome, M., Zahrowski, J. J., & Ah Kook, Y. (2017). Displacement and stress distribution by different bone-borne palatal expanders with facemask: A 3-dimensional finite element analysis. *American Journal of Orthodontics & Dentofacial Orthopedics*, 151(1), 105-117.

Infante Contreras, C. (2009). *Fundamentos para la evaluación del crecimiento, desarrollo y función craneofacial*. Bogota: Universidad Nacional de Colombia. .

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Instituto maxilofacial. (27 de 05 de 2021). *¿Qué es la expansión del paladar (Sarpe) y para qué sirve?* Obtenido de

<https://www.institutomaxilofacial.com/es/tratamiento/expansion-rapida-del-maxilar-o-expansion-palatina/>

Iseri, H., Tekkaya, A., & Bilgic, S. (1998). Biomechanical effects of rapid maxillary expansion on the craniofacial skeleton, studied by the finite element method. *Eur J Orthod.*

Janovic, A., Saveljic, I., Vukicevic, A., Nikolic, D., Rakocevic, Z., Jovicic, G., . . . Djuric, M. (2015). Occlusal load distribution through the cortical and trabecular bone of the human mid-facial skeleton in natural dentition: A three-dimensional finite element study. *Annals of Anatomy*, 16-23.

Lee, H., Nguyen, A., Hong, C., Hoang, P., Pham, J., & Ting, K. (2016). Biomechanical effects of maxillary expansion on a patient with. *American Journal Of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 313-323.

Li, X., Yin, Z., Wei, L., Yu, W., & Wan, S. (15 de Enero de 2011). *Symmetry and template guided completion of damaged skulls*. Obtenido de <https-www-sciencedirect.com.ecci.metaproxy.org/science/article/abs/pii/S009784931100020>

Livas Lara, M. (2015). *so del aparato ortopédico McNamara como factor de riesgo para desarrollar Trastornos Temporomandibula en una población infantil que asiste a la Clínica de Ortopedia de la acultad de Estomatología de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla*. Puebla: Universidad Autónoma de Puebla.

Llerena, M. E. (10 de 06 de 2021). *Univerisdad Internacional del Ecuador*. Obtenido de Prevalencia de la enfermedad periodontal y factores de riesgo locales asociados en una muestra de pacientes atendidos en clínicas de la Universidad Internacional

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

del Ecuador: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/853/1/T-UIDE-0718.pdf>

MacGinnis, M., Chu, H., Youssef, G., Wu, K. W., Machado, A. W., & Moon, W. (2014).

The effects of micro-implant assisted rapid palatal expansion (MARPE) on the nasomaxillary complex—a finite element method (FEM) analysis. *Progress in Orthodontics*.

Machado Pérez, P. P. (2015). : Simulación mediante el Método de Elementos Finitos de una articulación coxo-femoral sana.

Martinez, S. E., Schweizerhof, K., & Schindler, H. J. (2015). A Variable Finite Element Model of the Overall Human Masticatory System for Evaluation of Stress Distributions during Biting and Bruxism. En 2. 10^a European LS-DYNA Conference (Ed.). Alemania.

Mata, J., Zambrano, F., Quiros, O., & Rondon, S. (2007). *Expansión rápida de maxilar en Maloclusiones transversales*. Obtenido de <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2007/art-11/>

Mercado, S., & Mamali, L. (2018). *Maloclusiones y calidad de vida en adolescentes*. Obtenido de <https://www.usmp.edu.pe/odonto/servicio/2018/1324-4400-1-PB.pdf>

Mercado, S., Mamani, L., Mercado, J., & Tapia, R. (2018). Maloclusiones y calidad de vida en adolescentes. *Kiru*, 94-98.

Minsalud. (27 de 05 de 2021). *¿Qué es la salud bucal?* Obtenido de <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/ENT/aliados-por-la-salud-bucal-marzo-2017.pdf>

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Morales Quispe, M. (8 de 06 de 2021). *Centro de Investigación en Matemáticas Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*. Obtenido de Formulación de elementos finitos y elementos discretos: https://cimat.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1008/468/1/TE_1523.pdf

Morales, F. J. (2005). *Clasificación de la maloclusión en los planos anteroposterior, vertical y transversal*. Obtenido de <https://www.medigraphic.com/pdfs/adm/od-2007/od073d.pdf>

Nápoles Padrón, E., Gonzáles Carbonell, R., & Olivares Díaz, E. (2015). *Una introducción al análisis por elementos finitos: Aplicaciones y ejemplos*.

Naranjo, A. (2021). *Departamento de Electrónica y Automática*. Obtenido de Cabeza: <http://dea.unsj.edu.ar/biologia2/HUESO%20CABEZA.pdf>

Navarro Ugena, C., & Pérez Castellanos, J. (2021). *Universidad Calos III de Madrid*. Obtenido de Introducción al método de los elementos finitos: aplicación a la mecánica de sólidos: http://ocw.uc3m.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/ingenieria-estructural/material-de-clase-1/apuntes/Capitulo_9.-Introduccion_al_metodo_de_los_elementos_finitos.pdf

NFPT CEC. (01 de Julio de 2010). *Biomechanics: The Science of Human Movement*. Obtenido de <https://www.nfpt.com/blog/biomechanics-the-science-of-human-movement>

Odont Moder. (Enero de 2012). *Hueso Alveolar*. Obtenido de <https://www.imbiomed.com.mx/articulo.php?id=86664>

Ortoreding. (2018). *Disyuntor Hass*. Obtenido de <https://www.ortoreding.com/aparatologia/disyuncion-maxilar/disyuntor-de-hass/>

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Pallares Muñoz, M. R., & Pulecio Díaz, J. A. (2017). Aplicabilidad del método de los elementos finitos en el análisis y dimensionamiento de losas JCPC para carreteras de dos carriles. *ResearchGate*, 14, 148.

Palomares Morales, R., & Meneses Gomez, N. (18 de 05 de 2021). *Principales arbotantes anatómicas del macizo cráneo facial y aplicación clínica*. Obtenido de Universidad Inca Garcilaso de la Vega: <http://repositorio.uigv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.11818/2460/TRAB.SUF.PROF.PALOMARES%20MORALES%2C%20ROBERTH.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Paz Moya, M., Marquardt, K., & Olate, S. (2017). Caracterización de la Función Masticatoria en Estudiantes Universitarios. *Int. J. Odontostomat*, 495-499.

Pedrosa, C. V. (Julio de 2008). *Efectos de la expansion rapida del maxilar superior sobre la dimension y permeabilidad nasal*. Obtenido de https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/3971/27630_ventureira_pedrosa_cesar.pdf?sequence=1

Pegoretti, A., Fambri, L., Zappini, G., & Bianchetti, M. (2002). Finite element analysis of a glass fibre reinforced composite endodontic post. *Biomaterials*, 2667-2682.

Pinheiro, M., & Alves, J. L. (2015). The feasibility of a custom-made endoprosthesis in mandibular reconstruction: Implant design and finite element analysis. *Journal of Cranio-Maxillo-Facial Surgery*, 2116-2128.

Prado, F. B., Rodrigues Freire, A., Rossi, A. C., Ledogar, J., Smith, A., Dechow, P., . . . Ross, C. (2016). Review of In Vivo Bone Strain Studies and Finite Element Models of the Zygomatic Complex in Humans and Nonhuman Primates:

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Implications for Clinical Research and Practice. *The anatomical record*, 1753-1778.

Provatidis, C., Georgiopoulos, B., Kotinas, A., & McDonald, J. P. (2007). On the FEM modeling of craniofacial changes during rapid maxillary expansion. *Medical Engineering & Physics*, 29, 566-579.

Reyes, M. R., & Comas, R. B. (Marzo de 2015). Expansión rápida del maxilar con el tornillo Hyrax en un adolescente. *Medisan*, 417-421. Obtenido de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1029-30192015000300014

Shrivastava, N., Thkral, R., garg, A., Tripathi, A., & Marothiya, S. (2021). Stress Pattern and Deformation in Mid-palatal Suture and Posterior Dentoalveolar Area With Two Different Types of Rapid Maxillary Expansion Appliances: A Finite Element Method Study. *Journal of Indian Orthodontic Society.*, 55(3), 278-284.

Tanaka, O. M., Yukio Saga, A., Melo Pithon, M., & Andre Argenta, M. (2016). Stresses in the midpalatal suture in the maxillary protraction therapy: a 3D finite element analysis. *Progress in Orthodontics*.

Tirado, Á. M., Sequera, C. J., Rodríguez-Ciodaro, A., & Luna, L. E. (2018). *Respuesta mecánica del ligamento periodontal en dientes anteriores restaurados con coronas completas en circonio y dientes sin restauración, con periodonto normal y reducido mediante un análisis de elementos finitos*. Obtenido de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/57489/Lp%20y%20el%20elementos%20finitos%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=La%20literatura%20ha%20demostrado%20que,la%20trayectoria%20desde%20el%20esmalte>

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Trojan Serpe, L. C., Barbosa de Las Casas, E., Moreira Melo Toyofuku, A. C., & González Torres, L. A. (2014). Influência do comportamento biomecânico da sutura palatina mediana na expansão rápida da maxila RM. *XI Simpósio de Mecânica Computacional e II Encontro Mineiro de Modelagem Computacional*.

Universidad de las Américas Puebla. (27 de 06 de 2021). *Principios del método de análisis por elementos finitos y descripción de algor FEA*. Obtenido de Introducción al Método de Elementos Finitos: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/jimenez_p_a/capitulo2.pdf

Universidad Nacional de Colombia. (2016). *Guia de atencion en maloclusiones clase II*. Obtenido de http://www.odontologia.unal.edu.co/docs/habilitacion/guia_ort_maloc_clase_II.pdf

Universidad Nacional Autónoma de Mexico. (s.f.). *Universidad Nacional Autónoma de Mexico*. Recuperado el 2023, de Tema 2. Esfuerzo y deformación: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/109/5/A5.pdf>

Urrego Burbano, P. A., Jiménez Arroyave, L. P., Londoño Bolívar, M. Á., Zapata Tamayo, M., & Botero Mariaca, P. (2011). Perfil epidemiológico de la oclusión dental en escolares de Envigado, Colombia. *Salud publica, 13*(6), 1010-1021.

Vasquez, V. B. (2003). *Maloclusión Clase I: Definición, clasificación, características clínicas y tratamiento*. Obtenido de <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2003/art-8/>

Veira, D. (2019). *Maloclusiones verticales*. Obtenido de <https://www.propdental.es/ortodoncia/maloclusion/maloclusiones-verticales/>

	GUÍA PARA PRESENTACIÓN DE ANTEPROYECTO DE INVESTIGACIÓN (SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN)		Código: IF-IN-001 Versión:01
	Proceso: Investigación	Fecha de emisión: 22-Nov-2009	Fecha de versión: 22-Nov-2009

Vélez Muriel, S. M. (2020). *Estudio Computacional del Efecto de Cargas Mecánicas en el Comportamiento Biomecánico de un Injerto Alveolar*. Obtenido de Estudio Computacional del Efecto de Cargas Mecánicas en el Comportamiento Biomecánico de un Injerto Alveolar.

Yamamura, K., Inoue, M., & Yamada, Y. (2017). Coordination of cranial motoneurons during mastication. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, 129-302.

Yépez Castillo, H. (2014). *Pontificia Universidad Católica del Perú*. Recuperado el 2023, de Resistencia de Materiales 1A: <http://textos.pucp.edu.pe/pdf/4121.pdf>

Youssedd, R. E., Throckmorton, G. S., Ellis, E., & Sinn, D. (1997). Comparison of habitual masticatory patterns in men and women using a custom computer program. *The Journal of prosthetic dentistry*.

Zambrano Mata, J. (2009). Expansión rápida de Maxilar en Maloclusiones transversales: Revisión Bibliográfica. *Revista Latinoamericana de Ortodoncia y Odontopediatría*. Obtenido de <https://www.ortodoncia.ws/publicaciones/2009/art-24/>

Zen su, M., Hueng Chang, H., Chih Chiang, Y., Cheng, J. H., Jyh Fuh, L., Ying Wang, C., & Pin Lin, C. (2013). Modeling viscoelastic behavior of periodontal ligament with nonlinear finite element analysis. *Journal of Dental Sciences*, 121-128.