



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ  
FACULTAD DE INGENIERÍA

**POSGRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**PLANEACIÓN INTEGRAL DE PROCEDIMIENTOS QUIRÚRGICOS PARA  
CIRUGÍAS ORTOGNÁTICAS MAXILOFACIALES UTILIZANDO REALIDAD  
VIRTUAL Y SISTEMAS HÁPTICOS**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE**

**DOCTOR EN INGENIERÍA MECÁNICA  
CON ORIENTACIÓN TERMINAL EN MECATRÓNICA Y  
SISTEMAS MECÁNICOS**

**PRESENTA**

**JORGE ZARAGOZA SIQUEIROS**

**ASESOR**

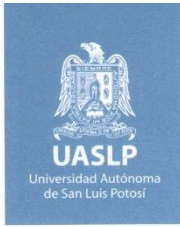
**DR. HUGO IVÁN MEDELLÍN CASTILLO**

San Luis Potosí, S.L.P.

Octubre de 2019







FACULTAD DE  
INGENIERÍA

15 de agosto de 2019

**M.I. JORGE ZARAGOZA SIQUEIROS  
P R E S E N T E**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. Hugo Iván Medellín Castillo** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Doctor en Ingeniería Mecánica con Orientación Terminal en Mecatrónica y Sistemas Mecánicos**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 15 de agosto del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**"Planeación integral de procedimientos quirúrgicos para cirugías ortognáticas maxilofaciales utilizando realidad virtual y sistemas hápticos"**

Introducción.

1. Antecedentes de los sistemas de realidad virtual en medicina.
2. Fundamentos de la cirugía ortognática.
3. Desarrollo del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas.
4. Análisis morfológico y diagnóstico virtual en cirugía ortognática.
5. Cirugía virtual de modelos y generación de plantillas quirúrgicas.
6. Evaluación del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas.

Conclusiones.

Referencias.

Apéndices.

**"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"**

**A T E N T A M E N T E**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ**  
DIRECTOR  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN

[www.uaslp.mx](http://www.uaslp.mx)

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336

Copia. Archivo  
\*etn.

"2019, aniversario 160 de la fundación del Instituto Científico y Literario de San Luis Potosí"



## Resumen

La cirugía ortognática maxilofacial (orthognathic surgery, OGS) es un procedimiento quirúrgico complejo para corregir las deformidades dentofaciales causadas por un inadecuado crecimiento maxilar. Este crecimiento anormal maxilar da origen a desalineaciones entre los maxilares superior e inferior, las cuales afectan la funcionalidad del paciente y ocasionan problemas de salud tal como problemas de dicción, problemas respiratorios, desordenes del sueño e infartos. Debido a la complejidad anatómica cráneo facial, la cirugía ortognática es uno de los procedimientos quirúrgicos más complejos que requiere una detallada y minuciosa planeación para garantizar la obtención de los resultados deseados en el paciente. Tradicionalmente la planeación de la cirugía ortognática implica las etapas de análisis facial y análisis cefalométrico donde se diagnóstica la problemática del paciente. Posteriormente el especialista adquiere modelos de yeso de las arcadas dentales del paciente y los monta en un articulador para simular la desalineación maxilar. Los modelos dentales son cortados y reposicionados para determinar el grado de desplazamiento maxilar requerido por el paciente. Sobre los modelos reposicionados el cirujano moldea resina acrílica para generar una plantilla quirúrgica con la nueva oclusión del paciente. La plantilla quirúrgica es empleada por el especialista en la cirugía real para transferir el plan quirúrgico al paciente. El proceso tradicional de planeación de cirugía ortognática es eficaz; sin embargo, puede verse afectado en cada una de sus etapas por la habilidad y destreza manual del especialista. Los errores asociados a la inadecuada ejecución manual del análisis facial y cefalométrico derivan en un diagnóstico incorrecto. Además, un incorrecto reposicionamiento manual de los modelos de yeso introduce muchas imprecisiones en la planeación quirúrgica, afectando los resultados postquirúrgicos e incrementando el tiempo y costo del tratamiento.

En la literatura se han propuesto diversos sistemas computacionales enfocados a mejorar el proceso de planeación de la OGS. Sin embargo, aunque estos sistemas incorporan herramientas informáticas avanzadas para la planificación de OGS, no han podido proporcionar una solución práctica. Lo anterior debido a que muchos de estos sistemas se enfocan solo en algunas etapas específicas del proceso de planeación quirúrgica, y su capacidad para transferir datos de planificación preoperatoria al quirófano es limitada.

En este trabajo de tesis se presenta el desarrollo un nuevo sistema de planeación quirúrgica asistida por computadora con el propósito de mejorar el proceso tradicional de planeación de OGS en términos del tiempo requerido para la generación del plan quirúrgico y los errores o imprecisiones asociados al proceso de planeación. El sistema propuesto fue desarrollado con base al proceso de planeación tradicional de OGS, y mediante el uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos en todas las etapas del proceso de planeación. El sistema incorpora herramientas CAD empleadas en la ingeniería para asistir al cirujano en el proceso de planeación. La funcionalidad del sistema propuesto fue evaluada mediante el desarrollo de un caso de estudio de un paciente ortognático, y utilizando el proceso de planeación tradicional y el proceso virtual propuesto. El caso de estudio fue analizado por un grupo de 6 cirujanos maxilofaciales (3 cirujanos novatos y 3 cirujanos expertos). Los resultados de la evaluación demuestran que mediante el uso del sistema propuesto es posible incrementar el desempeño del proceso de planeación ortognático al reducir hasta un 90% el tiempo de planeación del enfoque tradicional, y generando información quirúrgica clínicamente válida y útil para el proceso de cirugía real. Además, se ha demostrado que las herramientas virtuales de diagnóstico asistido reducen la posibilidad de errores de diagnóstico de cirujanos novatos y permite a cirujanos expertos corroborar su diagnóstico.

**Palabras clave:** *cirugía ortognática (OGS); realidad virtual (VR); tecnologías hápticas; cirugía asistida por computadora; planeación quirúrgica.*



## Abstract

The orthognathic surgery (OGS) is a complex surgical procedure applied in the correction of dentofacial deformities caused by an irregular maxillary growth. This abnormal maxillary growth originates misalignments between the superior and inferior maxillary, which affect the patient functionality and produce health diseases such diction and breathing problems, sleep disorders and heart attacks. Due to the complexity of the craneofacial anatomy, the orthognathic surgery is one of the most complex surgical procedures that requires a detailed and precise planning to achieve the desired surgical outcomes on the patient. Traditionally, the orthognathic surgery planning involves the facial analysis and cephalometric analysis. In these analyses the maxillary misalignment disease is diagnosed and the treatment defined. Subsequently, dental models of the patient are acquired and mounted on an articulator to simulate the maxillary misalignment. Next, the dental models are segmented and repositioned in order to determine the maxillary displacement required to correct the dentofacial deformities. On the repositioned dental models, the specialist molds a surgical aid with the patient's new occlusion. This surgical aid is used by the surgeon to transfer the surgical plan to the patient. The traditional ortognathic surgery planning process is effective; however, it can be affected by the specialist's manual skills. An inadequate manual execution of the facial and cephalometric analyses leads to incorrect diagnosis. Moreover, an incorrect manual repositioning of the dental models introduces many inaccuracies in the surgical planning, affecting the surgical outcomes and increasing the time and the cost of the treatment.

Several computer systems aimed at improving the orthognathic surgery planning process have been proposed in the literature. However, although these systems incorporate advanced computer tools for OGS planning, they have failed in providing a practical solution. This is due to the fact that many systems have only focused on some specific stages of the OGS planning process, and their ability to transfer the pre-operative data to the operative room, is limited.

In this thesis the development of a new computer-aided surgical planning system oriented towards improving the traditional OGS planning process, in terms of the surgical planning time and the errors or inaccuracies associated to the planning process, is presented. The proposed system was developed based on the traditional OGS planning process, and the use of virtual reality and haptic technologies through the entire planning process. The system incorporates CAD tools, commonly used in engineering, to assist the specialist during the planning process. The functionality of the proposed system was evaluated by means of a case study corresponding to an orthognathic patient, and using the traditional approach and the new proposed virtual approach. The case study was evaluated by a group of 6 maxillofacial specialists (3 novices and 3 experts). The evaluation results have proved that by means of the proposed virtual system, a 90% reduction of the planning time required by the traditional approach can be achieved, along with the generation of valid and useful surgical information for the real procedure. Moreover, it has been demonstrated that the virtual diagnosis tools reduce the diagnosis errors of novice surgeons, but they also help to corroborate the diagnosis of expert surgeons.

**Keywords:** *orthognathic surgery (OGS); virtual reality (VR); haptic technologies, computer aided surgery; surgery planning.*





*Para las dos personas más importantes en mi vida,  
a quienes amo infinitamente y por quienes vale  
la pena entregarlo todo.*

*Isabella Sayuri y Lupis.  
Mis dos amores.*



## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios por permitirme realizar y concluir satisfactoriamente este proyecto.

A mi novia, esposa y mejor amiga *Maria Guadalupe Ledesma*, por su amor, cariño, comprensión, apoyo incondicional y por estar al frente junto a mí en todo momento, en las buenas y no tan buenas.

A mi hija *Isabella Sayuri*, quien me brinda fuerza para salir adelante en todo momento.

A mis padres por su el impulso que me brindan a cada periodo de mi vida.

A mi asesor de tesis el *Dr. Hugo Iván Medellín Castillo* por todas sus sugerencias, asesoría, por sus consejos, correcciones, dedicación y paciencia que junto a su calidad humana y como profesionista es uno de los principales responsables en el desarrollo y conclusión de este proyecto.

A todos los profesores del posgrado que participaron en mi formación.

A la facultad de ingeniería por ser como mi segundo hogar.

A CONACYT por el apoyo otorgado por medio de la beca otorgada.

A la universidad *Heriot-Watt* por permitirme trabajar en conjunto con ellos durante mi estancia doctoral.

A todas aquellas personas que hicieron posible la realización de este proyecto:

*Dr. Héctor de la Garza*

*Dr. Jaime Reinoso*

*LE. Leticia Martínez*

*LA. J. José de Jesús Ledesma*

*Dra. Alma A. Cerda*

*Dra. Viridiana Macías*

*Dr. Wulfrano Sánchez*

*Dr. Eder H. Govea*

*MI. Omar Pérez*

*Dr. Teo Lim*

*Dr. Jim Ritchie*



## Publicaciones obtenidas

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha permitido lograr las siguientes publicaciones

- Zaragoza-Siqueiros, J., Medellin-Castillo, H.I., de la Garza-Camargo, H., Lim, T. and Ritchie, J.M., 2019. An integrated haptic-enabled virtual reality system for orthognathic surgery planning. *Computer methods in biomechanics and biomedical engineering*, 22(5), pp.499-517.
- Jorge Zaragoza-Siqueiros, Hugo I. Medellin-Castillo, Eder H. Govea-Valladares, James Ritchie, Theodore Lim, Aparajithan Sivanathan. Virtual reality applications for computer aided design and manufacture of medical devices. WSPC AM Book series. (Acceptado, por publicarse a principios de 2020).



## Contenido

Resumen	i
Abstract	iii
Dedicatoria	v
Agradecimientos	vii
Publicaciones obtenidas	ix
Contenido	xi
Índice de figuras	xv
Índice de tablas	xix
Abreviaciones	xxi
Introducción	1
Planeación de la cirugía ortognática	1
Realidad virtual y sistemas hápticos en la medicina	2
Realidad virtual y sistemas hápticos en la cirugía ortognática	3
Justificación	3
Hipótesis	3
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Organización de la tesis	4
Capítulo 1. Antecedentes de los sistemas de realidad virtual en medicina	5
1.1 Realidad virtual	5
1.2 Arquitectura de los sistemas de realidad virtual	6
1.2.1 Módulo de entrada de datos	7
1.2.2 Módulo de visualización y renderizado gráfico	7
1.2.3 Módulo de simulación	8
1.3 Sistemas de inmersión de usuario en la realidad virtual	8
1.4 Sistemas hápticos	9
1.4.1 Renderizado háptico	10
1.5 Aplicaciones de la realidad virtual	12
1.6 Realidad virtual en aplicaciones médicas	13
1.6.1 Desarrollo de aplicaciones médicas en realidad virtual.	18
1.7 Discusión	19
Capítulo 2. Fundamentos de la cirugía ortognática	21
2.1 Cirugía ortognática	21
2.1 Procedimiento quirúrgico ortognático	23
2.2 Planeación tradicional de cirugía ortognática	25
2.2.1 Análisis clínico facial	26
2.2.2 Análisis cefalométrico	28
2.2.3 Cirugía de modelos	30
2.2.4 Generación de férula quirúrgica	32

2.3 Herramientas virtuales para la planeación quirúrgica ortognática.	33
2.4 Discusión	37
Capítulo 3. Desarrollo del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas	39
3.1 Descripción del sistema	39
3.2 Interfaz gráfica	42
3.3. Módulo gráfico	45
3.4 Módulo físico-háptico	46
3.5 Módulo de entrada y extracción de información quirúrgica	49
3.6 Generación de proyecto de planeación quirúrgica virtual	51
3.7 Evaluación informática del sistema	54
3.7.1 Discusión de resultados	56
Capítulo 4. Análisis morfológico y diagnóstico virtual en cirugía ortognática	57
4.1 Análisis facial virtual	57
4.2 Análisis cefalométrico virtual	62
4.3 Evaluación del módulo de cefalometría	68
4.3.1 Resultados	70
4.3.2 Discusión de resultados	79
4.3.3 Discusión general	80
Capítulo 5. Cirugía virtual de modelos y generación de plantillas quirúrgicas	81
5.1 Cirugía virtual de modelos	81
5.1.1 Procedimiento general	81
5.1.2 Segmentado del modelo virtual	84
5.1.3 Reposicionamiento de segmentos virtuales	84
5.1.4 Interfaz de usuario	87
5.1.5 Características generales	89
5.2 Plantilla quirúrgica virtual	90
5.2.1 Procedimiento general	91
5.2.2 Generación paramétrica del modelo virtual de plantilla quirúrgica	92
5.2.3 Grabado oclusal	94
5.2.4 Interfaz de usuario	95
5.2.5 Características generales	96
5.3 Discusión general	97
Capítulo 6. Evaluación del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas	99
6.1 Objetivo de evaluación	99
6.2 Caso de estudio	99
6.3 Metodología de evaluación	100
6.4 Resultados	102
6.4.1 Análisis facial	102
6.4.2 Análisis cefalométrico	104
6.4.3 Cirugía de modelos	107
6.4.4 Generación de férula quirúrgica	111



6.4.5 Información quirúrgica _____	113
6.4.6 Desempeño en tiempo _____	113
6.5 Evaluación informática del sistema _____	113
6.6 Discusión general _____	114
Conclusiones _____	117
Referencias _____	121
Apéndice 1. Metodologías cefalométricas _____	131
Apéndice 2. Casos de estudio cefalométricos _____	147
Apéndice 3 Resultados de evaluación del módulo de cefalometría _____	157
Apéndice 4. Resultados de diagnóstico cefalométrico _____	183
Apéndice 5. Plan quirúrgico ortognático _____	189



## Índice de figuras

Figura 1.1 Arquitectura general de un sistema de realidad virtual.	7
Figura 1.2 Dispositivos de inmersión de usuario: (a) dispositivos hápticos de escritorio y guante, (b) monitores de proyección tridimensional, (c) pantallas para montaje en cabeza o head mounted display (HMD), (d) cabina de ambiente virtual, CAVE.	9
Figura 1.3 Secuencia de funcionamiento de un dispositivo háptico.	10
Figura 1.4 Arquitectura de un sistema de VR que emplea interfaces hápticas.	11
Figura 1.5 Ciclo de renderizado háptico.	11
Figura 1.6 Metodologías para el cálculo de fuerzas de retroalimentación en los sistemas hápticos: (a) método del elemento finito, (b) modelo masa-resorte.	12
Figura 1.7 Aplicaciones de la realidad virtual: (a) simulador de vuelo virtual, (b) sistema de ensamblajes virtuales en ingeniería, (c) desarrollo de nuevos productos, (d) edificación virtual, (e) atlas anatómico virtual, (f) simulador de exploración submarina.	13
Figura 1.8 Aplicaciones de la realidad virtual, (a) simulación quirúrgica, (b) planeación preoperatoria, (c) modelado de órganos, (d) análisis del caminar humano.	15
Figura 1.9 Arquitectura general de un sistema VR en aplicaciones médicas.	18
Figura 2.1 Problemas de desalineación maxilar corregidos por cirugía ortognática: (a) prognatismo mandibular u oclusión clase III, (b) retrognatismo mandibular u oclusión clase II, (c) mordida abierta, (d) asimetría facial, (d) sonrisa gingival.	22
Figura 2.2 Clases de posición oclusal: (a) oclusión clase I, (b) oclusión clase II, (c) oclusión clase III.	23
Figura 2.3 Herramientas de fijación ósea y asistencia quirúrgica empleadas en la cirugía ortognática: (a) placas de fijación ósea, (b) férula quirúrgica.	24
Figura 2.4 Patrones de fractura ósea involucrados en la cirugía ortognática: (a) LeFort I, (b) LeFort II, (c) osteotomía sagital de rama mandibular, BSSO, (d) genioplastia o mentoplastia.	25
Figura 2.5 Proceso tradicional de planeación de la cirugía ortognática.	26
Figura 2.6 Metodologías de análisis clínicos faciales: (a) análisis de tercios faciales, (b) análisis de quintos faciales, (c) análisis de Powell, (d) normas angulares de armonía facial para el análisis de Powell y tipo de tratamiento recomendado.	27
Figura 2.7 Análisis cefalométrico tradicional: (a) identificación de puntos anatómicos, (b) herramientas de medición empleadas en el análisis cefalométrico.	28
Figura 2.8 Modelos de yeso empleados en la planeación de cirugía ortognática montados en articulador.	30
Figura 2.9 Modelos de yeso seccionados. (a) líneas de referencia marcadas sobre modelos, (b) seccionado de modelos.	30
Figura 2.10 Modelos de yeso reposicionados.	31
Figura 2.11 Cuantificación de desplazamiento en la cirugía de modelos.	31
Figura 2.12 Generación de férula quirúrgica: (a) generación de férula quirúrgica de cera sobre los modelos de yeso reposicionados, (b) férula quirúrgica de acrílico, (c) férula quirúrgica empleándose durante la reposición maxilar.	32
Figura 2.13 Sistema de cefalometría asistida por computadora.	33
Figura 3.1 Arquitectura de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.	41
Figura 3.2 Interfaz gráfica de la plataforma OSSys v2.0.	42

Figura 3.3 Menú principal y submenús de la plataforma OSSys v2.0: (a) menú principal, (b) menú new, (c) menú edit, (d) menú view, (e) menú project, (f) menú diagnosis, (g) menú cephalometry, (h) menú planning, (i) menú results, (j) menú haptic. _____	43
Figura 3.4 Panel de exploración de proyecto. _____	44
Figura 3.5 Modelo tridimensional reconstruido a partir de imágenes DICOM: (a) malla del modelo tridimensional, (b) visualización modelo tridimensional en el ambiente virtual de OSSys v2.0. _____	45
Figura 3.6 Alineación del modelo virtual del paciente sobre los ejes coordenados de la escena virtual. _____	46
Figura 3.7 Dispositivos hápticos que pueden ser empleados en el sistema OSSys: (a) Phantom Omni de Sensable, (b) Novint Falcon. _____	46
Figura 3.8 Modelos tridimensionales generados dentro del ambiente virtual. _____	47
Figura 3.9 Secuencia de manipulación háptica de objetos virtuales. _____	49
Figura 3.10 Formulario de información clínica del paciente: (a) información general del paciente, (b) historial clínico del paciente, (c) estatus dental del paciente. _____	50
Figura 3.11 Ventana de exploración de archivos. _____	52
Figura 3.12 Sub-carpetas digitales generadas al crear un proyecto de planeación de OGS. _____	52
Figura 3.13 Panel de herramientas de cada uno de los cuatro principales módulos de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0: (a) panel del módulo de análisis facial, (b) panel del módulo de análisis cefalométrico, (c) panel del módulo de cirugía de modelos, (d) panel de generación de férula quirúrgica. _____	54
Figura 3.14 Información médica empleada en la evaluación del rendimiento de la plataforma OSSys v2.0: (a) radiografía digital del paciente, (b) modelo 3D. _____	55
Figura 4.1 Proceso general del análisis facial empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	58
Figura 4.2 Puntos anatómicos requeridos por el módulo de análisis facial de acuerdo a: a) metodología de tercios faciales, b) metodología de quintos faciales, y c) análisis de Powell. _____	59
Figura 4.3 Estándar de armonía facial empleado en el análisis de Powell. _____	60
Figura 4.4 Informe de resultados generado de forma automática tras efectuar el análisis facial en OSSys v2.0. _____	61
Figura 4.5 Interfaz gráfica del módulo de análisis facial: a) menú Diagnosis de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas, y c) panel de resultados, y d) ventana de explorador de archivos para la carga de imágenes del paciente. _____	61
Figura 4.6 Proceso general del cefalometría virtual empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	64
Figura 4.7 Escala gráfica de la radiografía lateral de cráneo. _____	65
Figura 4.8 Interfaz gráfica del módulo de análisis cefalométrico: a) menú Cephalometry del menú principal de herramientas, b) panel de herramientas, c) ventana de calibración de radiografía, d) ventana de selección de análisis cefalométrico a efectuar, y e) panel _____	66
Figura 4.9 Informe de resultados y diagnóstico cefalométrico generado por el módulo de cefalometría de la plataforma OSSys. _____	68
Figura 4.10 Proceso general de evaluación del módulo de cefalometría virtual integrado en OSSys v2.0. _____	70
Figura 4.11 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de McNamara (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0). _____	72
Figura 4.12 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de Steiner (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0). _____	72
Figura 4.13 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de Ricketts (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0). _____	73

Figura 4.14 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de McNamara y el proceso tradicional de cefalometría. _____	74
Figura 4.15 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso tradicional de cefalometría. _____	74
Figura 4.16 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso tradicional de cefalometría. _____	75
Figura 4.17 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de McNamara y el proceso virtual de cefalometría. _____	76
Figura 4.18 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso virtual de cefalometría. _____	76
Figura 4.19 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Ricketts y el proceso virtual de cefalometría. _____	77
Figura 5.1 Proceso general de la cirugía virtual de modelos empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.	82
Figura 5.2 Modelo 3D del paciente renderizado en la escena virtual de la plataforma OSSys v2.0. _____	83
Figura 5.3 Esquema de transformación homogénea de coordenadas empleada por el módulo de cirugía de modelos. _____	85
Figura 5.4 Fragmentos maxilares repositionados virtualmente empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	87
Figura 5.5 Reporte de reposicionamiento maxilar generado por el módulo de cirugía de modelos de OSSys v2.0.	87
Figura 5.6 Interfaz gráfica del módulo de cirugía virtual de modelos: a) menú Planning de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas del módulo, c) ventana de selección del proceso ortognático a simular, y d) ventana de explorador de archivos par _____	88
Figura 5.7 Comparación entre el método tradicional y virtual de cirugía de modelos. _____	90
Figura 5.8 Proceso general de generación de la plantilla quirúrgica empleando OSSys v2.0. _____	91
Figura 5.9 Puntos anatómicos oclusales. _____	92
Figura 5.10 Parámetros de diseño del modelo inicial de férula quirúrgica. _____	92
Figura 5.11 Archivo de texto del modelo inicial de férula quirúrgica generado en formato OBJ. _____	94
Figura 5.12 Operación booleana de diferencia gráfica. _____	95
Figura 5.13 Modelo de férula quirúrgica con el grabado oclusal, generada en la plataforma OSSys v2.0. _____	95
Figura 5.14 Interfaz gráfica del módulo de generación de plantilla quirúrgica: a) menú Planning de la barra principal de herramientas, y b) panel de herramientas del módulo. _____	96
Figura 6.1 Fotografías del paciente: a) frontal de rostro, b) lateral de rostro. _____	99
Figura 6.2 Información digital del paciente: a) radiografía lateral de cráneo, b) modelo 3D del cráneo del paciente. _____	100
Figura 6.3 Metodología general del proceso de evaluación de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	101
Figura 6.4 Reporte de resultados de análisis facial empleando el enfoque virtual. _____	103
Figura 6.5 Proceso de análisis cefalométrico: a) método tradicional, b) método virtual empleando OSSys v2.0.	105
Figura 6.6 Reporte de resultados de análisis cefalométrico de Ricketts generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	106
Figura 6.7 Modelo de yeso de las arcadas dentales del paciente montado sobre articulador maxilar. _____	107
Figura 6.8 Proceso de reposicionamiento maxilar para el caso de estudio, empleando la plataforma OSSys v2.0; (a) modelo 3D del paciente renderizado, (b) puntos anatómicos que permiten el seccionado del modelo 3D del paciente seleccionados. (c) modelo del paciente. _____	108
Figura 6.9 Reporte de reposicionamiento maxilar generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. _____	110

Figura 6.10 Plantilla quirúrgica: a) férula quirúrgica virtual generada en OSSys, b) férula fabricada empleando manufactura aditiva, c) férula quirúrgica generada de forma tradicional. \_\_\_\_\_ 112

## Índice de tablas

Tabla 1.1 Características de algunos sistemas de realidad virtual enfocados a la medicina. _____	16
Tabla 2.1 Metodologías de análisis cefalométrico empleadas en cirugía ortognática. _____	29
Tabla 2.2 Características principales de sistemas para la planeación de cirugía ortognática asistida por computadora. _____	35
Tabla 3.1 Funciones incluidas en la barra de herramientas de planeación quirúrgica. _____	44
Tabla 3.2 Información quirúrgica relevante en cada fase del proceso de planeación de OGS. _____	51
Tabla 3.3 Recursos informáticos promedio requeridos por la plataforma virtual OSSys v2.0 para la ejecución de diversas tareas del proceso de planeación virtual de OGS. _____	55
Tabla 4.1 Métricas de evaluación definidas para la evaluación de cada hipótesis. _____	69
Tabla 4.2 Tiempo de análisis para novatos y expertos empleando la metodología de análisis cefalométrico de McNamara, Steiner y Ricketts mediante el proceso tradicional y el método virtual. _____	71
Tabla 4.3 Diagnóstico de referencia generado por médicos expertos de forma tradicional para cada caso de estudio. _____	77
Tabla 4.4 Porcentaje de coincidencia en el diagnóstico cefalométrico tomando como referencia el diagnóstico tradicional generado por expertos. _____	78
Tabla 5.1 Puntos anatómicos requeridos para generar el segmentado del modelo virtual de cada procedimiento ortognático. _____	83
Tabla 6.1 Métricas de evaluación definidas para la evaluación del sistema OSSys v2.0. _____	102
Tabla 6.2 Resultados de la evaluación del proceso de análisis facial, obtenidos empleando los métodos tradicional y virtual de planeación quirúrgica ortognática. _____	103
Tabla 6.3 Resultados del proceso de cefalometría empleando los métodos tradicional y virtual. _____	105
Tabla 6.4 Resultados del proceso de cirugía de modelos utilizando los métodos tradicional y virtual. _____	109
Tabla 6.5 Resultados de la evaluación del proceso de generación de férula quirúrgica utilizando los métodos tradicional y virtual. _____	111
Tabla 6.6 Tiempo de ejecución para cada etapa del proceso planeación quirúrgica ortognática mediante el método tradicional y el método virtual. _____	113
Tabla 6.7 Recursos informáticos empleados por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0, en las tareas identificadas con mayor demanda computacional. _____	114





## Abreviaciones

$\alpha$	Nivel de significancia
$\beta$	Ángulo entre dos rectas
2D	Dos dimensiones
3D	Tridimensional
AM	Manufactura aditiva (Additive manufacturing)
AR	Realidad aumentada (Augmented reality)
$b_i$	Intersección sobre el eje y de la recta
$c$	Constante de amortiguamiento
CAD	Diseño asistido por computadora (Computer aided design)
CAE	Ingeniería asistida por computadora (Computer aided surgery)
CAM	Manufactura asistida por computadora (Computer aided manufacture)
CAS	Cirugía asistida por computadora (Computer aided surgery)
CAVE	Sala de realidad virtual
cf	Factor de corrección
CT	Tomografía computarizada (Computer tomography)
DoF	Grados de libertad (Degree of freedom)
$d_{p1-p2}$	Distancia entre dos puntos cefalométricos
$d_{p4-recta1}$	Distancia perpendicular de un punto a una recta
$D_{real}$	Dimensión real
EAS	Cirugía asistida por computadora (Engineering aided surgery)
F	Fuerza
FEA	Análisis por elemento finíto (Finite element analysis)
FEM	Método del elemento finíto (Finite element method)
GB	Gigabyte
HMD	Pantalla para montaje de cabeza (Head mounted display)
$H_o$	Hipótesis nula
Hz	Hertz
$k$	Constante de resorte
kHz	Kilohertz
LoR	Nivel de realismo (Level of realism)
$m$	Pendiente de la recta
$m$	Masa
$m$	Pendiente de la recta
MB	Megabyte
MFC	Microsoft Foundation Classes
mm	Milímetro
MRI	Resonancia magnética (Magnetic resonance imaging)
MS	Sistema masa-resorte (Mass-spring system)

MSD	Sistema masa-resorte-amortiguador (Mass-spring-damper system)
OGS	Cirugía ortognática (Ortognathic surgery)
OSSys	Sistema de cirugía ortognática (Ortognathic surgery system)
RAM	Memoria de acceso aleatorio (Random-access memory)
RE	Ingeniería inversa (Reverse engineering)
seg	Segundo
VE	Ambiente virtual (Virtual environment)
VR	Realidad virtual (Virtual reality)
$\ddot{x}$	Aceleración de la masa
$\dot{x}$	Velocidad de la masa
$x$	Desplazamiento de la masa
$X_p$	coordenada en x del punto
$X_{p1}$	Coordenada en x del punto inicial de la recta
$X_{p2}$	Coordenada en x del punto final de la recta
$X_{pi}$	Coordenada en x del punto de intersección de dos rectas
$Y^2_{v.ref 1}$	Coordenada virtual y del punto inicial de referencia,
$Y^2_{v.ref 2}$	Coordenada virtual y del punto final de referencia,
$Y_p$	coordenada en y del punto
$Y_{p1}$	Coordenada en y del punto inicial de la recta
$Y_{p2}$	Coordenada en y del punto final de la recta
$Y_{pi}$	Coordenada en y del punto de intersección de dos rectas

## Introducción

### Planeación de la cirugía ortognática

Entre los procedimientos médicos más complejos se encuentran la corrección de deformidades o desarmonías dentofaciales, los cuales son atendidos por cirujanos maxilofaciales y ortodoncistas. Las deformidades dentofaciales se originan debido a un escaso o excesivo crecimiento maxilar y dental, dando lugar a un problema de desarmonía facial causado por la desalineación entre los maxilares superior e inferior y la desalineación dental. Las tres regiones faciales afectadas por la deformidad dentofacial corresponden a la región maxilar, dental y los tejidos blandos. Cuando el crecimiento maxilar inadecuado solo afecta la posición de los dientes se requiere efectuar un tratamiento de reposicionamiento dental por medios mecánicos empleando la ortodoncia. Sin embargo, si la alteración afecta los maxilares se requiere del tratamiento quirúrgico, el cual corresponde a la cirugía ortognática (Orthognathic surgery, OGS).

Las desarmonías dentofaciales afectan directamente al paciente de forma funcional, imposibilitándolo para masticar y afectando su dicción al hablar. Además, el paciente que presenta un problema de desalineación dentofacial sufre constantemente de dolor y alteraciones musculares en el cuello y/o la cara, así como dificultades respiratorias que pueden desencadenar trastornos del sueño y hasta infartos. De acuerdo con estudios al 2010 entre un 12 y 17 por ciento de la población mundial presenta algún problema de desalineación maxilar [1], y en México en el periodo de 2014 a 2016 se registraron más de 8000 casos de cirugía ortognática por año [2].

El tratamiento de cirugía ortognática exige una planeación quirúrgica minuciosa para poder garantizar que el paciente obtenga los resultados deseados y sea posible prevenir las complicaciones asociadas a la desarmonía facial [3, 4]. Por lo tanto, el éxito en la cirugía ortognática depende de una cuidadosa planeación quirúrgica en la cual el especialista genere toda la información necesaria para la cirugía real [3].

El proceso de planeación quirúrgica ortognática tradicional consta de 4 etapas, Figura 1 [3], las cuales se enlistan a continuación [3]:

1. *Análisis facial*: el cirujano obtiene las relaciones faciales del paciente sobre fotografías del rostro empleando instrumentos de medición (reglas y escuadras) de uso común. Las relaciones faciales obtenidas son comparadas con un estándar de armonía facial para establecer un prediagnóstico y tratamiento a la problemática del paciente, el cual puede ser quirúrgico u ortodoncia.
2. *Análisis cefalométrico*: el especialista emplea la radiografía lateral de cráneo del paciente para obtener las relaciones óseas de la anatomía craneomaxilar del paciente empleando instrumentos de medición como reglas y transportador. Las relaciones óseas obtenidas son comparadas con un estándar de armonía ósea facial acorde al grupo étnico del paciente, y se determina el grado de desalineación maxilar obteniéndose el diagnóstico definitivo.
3. *Cirugía de modelos*: cuando se requiere un tratamiento quirúrgico, el cirujano adquiere impresiones de yeso de las arcadas del paciente las cuales son montadas sobre un articulador maxilar que le permite simular la posición maxilar desalineada del paciente. Posteriormente, el especialista reposiciona los modelos de yeso de las arcadas del paciente, auxiliándose de herramientas de corte convencionales, hasta obtener la posición idónea de las arcadas dentales del paciente.
4. *Generación de plantilla quirúrgica*: una vez que se obtiene la posición maxilar deseada en la cirugía de modelos, el especialista moldea manualmente resina acrílica sobre los modelos de yeso reposicionados con el fin de grabar la oclusión corregida del paciente y obtener una plantilla que le guiará en el reposicionamiento maxilar durante la cirugía real.

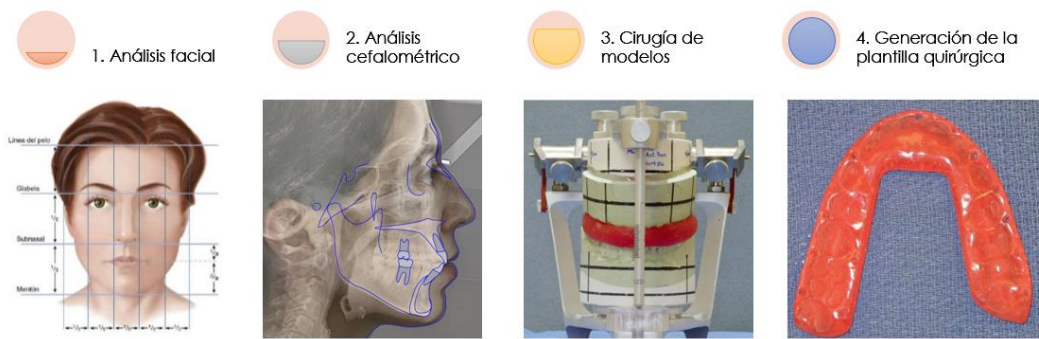


Figura 1. Proceso tradicional de planeación ortognática.

En cada una de las etapas del proceso de planeación el cirujano recolecta información relevante que le auxiliará en la cirugía real, como lo es: las relaciones faciales y cefalométricas, el grado de desplazamiento maxilar requerido por el paciente y la plantilla quirúrgica. Sin embargo, aunque el enfoque tradicional de planeación ortognática es eficaz, el éxito del proceso se puede ver afectado en todas las etapas debido a una mala adquisición de las relaciones faciales y cefalométricas, una inadecuada generación de los modelos de yeso de las arcadas maxilares del paciente, y un inadecuado montaje, manipulación, corte, sujeción, alineación y ajuste del modelo en la fase de cirugía de modelos, [5]. Por lo tanto, la planeación preoperatoria representa un desafío significativo para los cirujanos y una alta inversión de tiempo, en particular con malformaciones complejas [3, 6, 7].

### Realidad virtual y sistemas hápticos en la medicina

La práctica de la medicina es un proceso complejo que requiere un alto nivel de conocimiento, experiencia y habilidades manuales [8]. Tradicionalmente, el profesional de la medicina obtiene las habilidades manuales mediante el entrenamiento y la práctica profesional; lo cual es un proceso lento que requiere varios años y puede poner en riesgo la integridad del paciente. Para obtener experiencia y habilidades, un estudiante de medicina debe ser el protagonista de su formación, pero teniendo como principal prioridad evitar los riesgos y los inconvenientes innecesarios para el paciente [9]. En consecuencia, se han desarrollado simuladores para el entrenamiento de la práctica médica y quirúrgica [10].

En los últimos 20 años la evolución de las tecnologías computacionales y de gráficos ha permitido la representación de datos científicos, médicos, experimentales, etc., así como el desarrollo de simuladores y juegos. Dentro de las tecnologías de gráficos se encuentra la realidad virtual (Virtual reality, VR), la cual tiene como finalidad generar un entorno virtual con “apariencia de realidad” que le permita al usuario tener la sensación de estar inmerso en ella. Mediante el uso de herramientas de cómputo y otros dispositivos inmersivos como los sistemas hápticos, es posible incrementar el grado de inmersión de las aplicaciones de VR. Los sistemas hápticos permiten al usuario tocar, sentir, interactuar y manipular los objetos simulados en entornos virtuales y en sistemas teleoperados, mediante la retroalimentación de fuerza al usuario [11, 12].

Las aplicaciones de la realidad virtual y sistemas hápticos se han dirigido a diversas áreas del conocimiento, como lo son: la medicina, el entretenimiento, la manufactura, la educación y el entrenamiento [13]. Una de las aplicaciones de mayor trascendencia de la VR son los sistemas orientados a la medicina, en donde se han desarrollado simuladores que asisten a los especialistas en tareas médicas como el diagnóstico, la planeación y la simulación de diferentes procedimientos quirúrgicos en un entorno virtual [14, 15]. Los sistemas basados en la realidad virtual y los sistemas hápticos orientados a la medicina representan un enfoque basado en el conocimiento y la experiencia en el que se incorporan las habilidades quirúrgicas de los cirujanos, permitiendo la formación de estudiantes de medicina y profesionales novatos. Además, el sentido del tacto se ha integrado

en muchos de estos sistemas a través de la inclusión de los sistemas hápticos [16-19]. Los sistemas hápticos conceden al médico la interacción táctil con el modelo virtual del paciente y permiten el movimiento en tiempo real de los instrumentos quirúrgicos virtuales [8, 20-22]; brindando a los médicos la capacidad de aumentar su rendimiento al reducir el tiempo de planeación y aumentar sus habilidades manuales [21-24].

### **Realidad virtual y sistemas hápticos en la cirugía ortognática**

A partir de los avances en realidad virtual, el proceso de planeación tradicional de la OGS comenzó a evolucionar mediante el desarrollo de sistemas computacionales para llevar a cabo de forma rápida análisis cefalométricos 2D [25]. Posteriormente se incluyeron las tecnologías de escaneo e ingeniería 3D, lo que permitió la reconstrucción y visualización en 3D del cráneo del paciente, la segmentación del modelo virtual del paciente, el desplazamiento y la reubicación de fragmentos óseos, y el diseño y la fabricación de guías quirúrgicas para ayudar a la cirugía real [26-29]. En estos sistemas de planeación de la cirugía ortognática se integran herramientas de ingeniería como el diseño asistido por computadora (Computer aided design, CAD) y la fabricación asistida por computadora (Computer aided manufacture, CAM) en la etapa de cirugía de modelos y generación de férula quirúrgica, respectivamente. Además, la integración del sentido del tacto y la retroalimentación de fuerza en un entorno virtual para la planeación de OGS facilita el seccionamiento y la alineación del hueso, permitiendo a los usuarios explorar características anatómicas y reducir la curva de aprendizaje de habilidades para cirujanos novatos [16, 30]. Los sistemas más modernos integran herramientas de realidad aumentada, con el objetivo de transferir el plan quirúrgico al paciente durante la cirugía real [31].

### **Justificación**

Diversos trabajos en la literatura han reportado que el uso de sistemas orientados a la planeación quirúrgica asistida por computadora mejora el proceso tradicional de planeación de la cirugía ortognática. De acuerdo con lo reportado en [32], las funcionalidades mínimas necesarias en un sistema de planificación OGS son la capacidad de ejecutar análisis cefalométricos, la segmentación del modelo virtual del paciente y el reposicionamiento de los segmentos óseos virtuales. Sin embargo, estas herramientas informáticas no han podido proporcionar una solución integral que permita incrementar la eficiencia de todas las etapas del proceso de planeación de forma conjunta, ya que se han desarrollado como módulos separados, centrándose en asistir al especialista solo en etapas específicas del proceso de planeación [33-35]. En consecuencia, el desarrollo de diversas etapas del proceso de planeación de OGS depende de las habilidades manuales del cirujano, desencadenando posibles errores de diagnóstico y de planeación quirúrgica. Además, la transferencia de información quirúrgica a lo largo del proceso de planeación preoperatoria hasta la sala de operaciones, sigue siendo un problema importante en los sistemas que han sido propuestos para la planeación ortognática basados en la realidad virtual.

A pesar de que se han reportado diversos sistemas computacionales en la literatura para mejorar el proceso de planeación de OGS, se observa una brecha para que los sistemas desarrollados incluyan todas las etapas del proceso de planeación en un mismo sistema. Por lo tanto, se identifica la necesidad de desarrollar un sistema computacional que permita realizar de manera integral el proceso de planeación de cirugías ortognáticas, y que mejore el desempeño del proceso de planeación tradicional mediante la reducción del tiempo requerido para llevar a cabo la planeación quirúrgica y la reducción de los errores asociados a dicho proceso.

### **Hipótesis**

Se considera que mediante el uso de realidad virtual y sistemas hápticos es posible realizar de manera integral y más eficiente el proceso de planeación quirúrgica ortognática. Lo anterior mediante el desarrollo de herramientas computacionales que permitan al cirujano seccionar y manipular libremente los objetos, así como percibir el comportamiento físico de los objetos y su interacción en un entorno virtual inmersivo; extrayendo

información útil para la práctica quirúrgica real. De esta manera será posible generar una herramienta que permita auxiliar al cirujano en todas las etapas del proceso de planeación.

### **Objetivo general**

El objetivo general del proyecto es lograr la virtualización del proceso de planeación de cirugías ortognáticas, así como mejorar su desempeño en términos de tiempo y errores, incrementando de esta manera la eficiencia del proceso de planeación de OGS.

### **Objetivos específicos**

Para lograr el objetivo general de este trabajo de investigación, se definen los siguientes objetivos particulares:

1. Desarrollo de una plataforma de programación virtual-háptica que permita generar e implementar todas las etapas del proceso de planeación quirúrgica ortognática.
2. Integración del comportamiento físico de los objetos al ambiente virtual.
3. Integración de herramientas empleadas en la ingeniería para la generación de plantillas quirúrgicas.
4. Extracción de información relevante en cada etapa del proceso de planeación de OGS.
5. Generación automática del plan quirúrgico ortognático.
6. Evaluación y análisis comparativo entre el proceso de planeación quirúrgico tradicional y el proceso de planeación virtual-háptico.

### **Organización de la tesis**

El presente documento de tesis está organizado de la siguiente manera. En el Capítulo 1 se presentan los conceptos relacionados a la realidad virtual, los sistemas hápticos y sus aplicaciones. Conjuntamente, se presenta una revisión de la literatura de las aplicaciones propuestas orientadas a la medicina que se basan en la realidad virtual. En el Capítulo 2 se describen los fundamentos de la cirugía ortognática, el proceso de planeación quirúrgico y se presenta una revisión de los sistemas reportados para la planeación virtual de OGS. En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 propuesta, así como sus características y funcionalidad. En el Capítulo 4 se muestra el desarrollo e implementación de los módulos facial y cefalométrico, que se integran en el sistema propuesto. Además, se presenta el proceso de evaluación y análisis de resultados efectuado para el módulo de cefalometría. En el Capítulo 5 se describe el desarrollo e implementación de los módulos de cirugía virtual de modelos y generación de la férula quirúrgica, respectivamente; detallando sus características y herramientas. El Capítulo 6 presenta el desarrollo de un caso de estudio empleando los enfoques de planeación quirúrgica tradicional y planeación quirúrgica virtual empleando OSSys v2.0. De igual manera se presentan los resultados obtenidos del análisis comparativo entre ambos enfoques. Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo de tesis, exponiendo los resultados más relevantes y las contribuciones realizadas.

## Capítulo 1. Antecedentes de los sistemas de realidad virtual en medicina

Las tecnologías de realidad virtual permiten la creación de un entorno artificial donde el usuario puede visualizar e interactuar con los objetos virtuales. En el área de la medicina la realidad virtual se ha empleado para mejorar los procedimientos médicos tradicionales al permitir a los usuarios obtener la sensación de inmersión en un mundo real visualizando la anatomía humana para la simulación, planeación y entrenamiento de diversos procedimientos médicos. Además, permite el diseño de prótesis y herramientas quirúrgicas, las cuales son comúnmente desarrolladas en sistemas CAD por ingenieros experimentados.

En este capítulo, se presentan los antecedentes de los sistemas de realidad virtual y su inclusión en el área de la medicina.

### 1.1 Realidad virtual

La realidad virtual se puede describir como un conjunto de tecnologías que permiten a las personas interactuar con un entorno virtual más allá de la realidad [36]. Una de las características de la VR es el aprovechamiento del desarrollo computacional y la visualización científica para crear un mundo de apariencia real el cual brinda al usuario la sensación de estar inmerso en él [37]. Esta característica ha permitido el desarrollo de aplicaciones computacionales basadas en VR que asisten al usuario en la ejecución, simulación, planeación y entrenamiento de tareas específicas que presentan un riesgo, o requieren un alto grado de habilidad o precisión en el mundo real [38].

El uso de la realidad virtual se ha vuelto muy popular ya que puede ofrecer un alto nivel de realismo (Level of realism, LoR) e inmersión; sin embargo, para lograr un alto nivel de realismo dentro del ambiente virtual (Virtual environment, VE) se requieren tecnologías informáticas avanzadas capaces de procesar grandes cantidades de datos y gráficos científicos [39]. Lo anterior ha generado que numerosas investigaciones se centren en el desarrollo de algoritmos de cómputo gráfico y en sistemas de inmersión de usuario [40].

Dentro de las limitantes de la VR y las aplicaciones asistidas por computadora se encuentra el diseño y desarrollo del entorno virtual, que comprende el modelado de los objetos virtuales, incluida su geometría, sus características físicas y de superficie, como colores, texturas, etc., aumentando su nivel de realismo [38]. Sin embargo, conforme el LoR del entorno virtual aumenta, la cantidad de datos necesarios para ser procesados por la aplicación de realidad virtual se incrementará afectando el rendimiento de las aplicaciones [38].

Por lo tanto, el dilema en el proceso de desarrollo de entornos virtuales se encuentra en encontrar el punto óptimo en la cantidad de procesamiento de datos para aumentar la precisión de los resultados empleando el mínimo de recursos informáticos para obtener un LoR aceptable [40]. Lo anterior implica que en ocasiones sea necesario sacrificar el nivel de realismo para priorizar el procesamiento de datos y la respuesta temporal del sistema. Por esta razón, algunos trabajos de investigación se han centrado en determinar el nivel apropiado de realismo e inmersión requerido para diferentes aplicaciones de VR [40].

## 1.2 Arquitectura de los sistemas de realidad virtual

Dentro de un sistema de realidad virtual es posible encontrar múltiples elementos y características en los cuales intervienen diversos fenómenos que forman parte de diversas áreas del conocimiento como la ingeniería mecánica, física, informática, computación, entre otras [41-43]. Entre las características que un sistema de VR debe considerar se encuentran las siguientes [43]:

1. *Capacidad interactiva*: permitir al usuario interactuar libremente con los objetos virtuales y la escena virtual, la cual debe proyectarse directamente sobre una pantalla de computadora o un dispositivo de proyección tridimensional [44].
2. *Interacción implícita*: capturar la voluntad del usuario durante la interacción con los objetos virtuales simulando el comportamiento de los objetos como sucedería en la realidad. Dentro de la interacción implícita intervienen factores como [43, 44]:
  - *Simulación del comportamiento físico*: capacidad de simular el efecto de fuerzas como la gravedad y las leyes básicas de movimiento de los objetos como la inercia en el ambiente virtual.
  - *Deformaciones*: cálculo y simulación de la deformación de los objetos de acuerdo con sus propiedades físicas y las fuerzas que se le aplican.
  - *Detección de colisiones*: capacidad de detectar colisiones entre los objetos y evitar que existan dos o más objetos virtuales en la misma posición en el espacio.
  - *Realidad virtual aumentada*: incorporar opciones que brinden información de la tarea u objeto virtual en un menú que forma parte de la escena como el resto de los objetos.
  - *Sistemas de reconocimiento de voz*: recibir información e instrucciones por medio de comandos de voz, en sustitución del ratón o teclado.
3. *Inmersión sensorial*: generar los estímulos sensoriales necesarios para que el usuario tenga la percepción de desconexión con el mundo real y se adentre en el ambiente virtual. La capacidad y calidad que tiene el sistema para proporcionar estímulos adecuados a los sentidos humanos (vista, oído, olfato y gusto) 3 del equilibrio y la cinestesia son factores que intervienen en la inmersión sensorial [44].

Las características que consideran los sistemas de VR se encuentran generadas por elementos informáticos y de hardware que se interrelacionan y se comunican entre sí, y constituyen la arquitectura general del sistema de realidad virtual, Figura 1.1. Dentro de los elementos que conforman la realidad virtual se consideran los siguientes módulos, los cuales trabajan en conjunto con dispositivos de inmersión de usuario y proyección gráfica para lograr el nivel de realismo requerido por la aplicación de VR [42, 43]:

- Módulo de entrada de datos.
- Módulo de visualización y renderizado gráfico.
- Módulo de simulación.





Figura 1.1 Arquitectura general de un sistema de realidad virtual.

### 1.2.1 Módulo de entrada de datos

Este módulo es responsable de permitir al usuario introducir al ambiente virtual información relativa a la aplicación que se enfoca el sistema VR. Entre la información que puede ser introducida se encuentran modelos tridimensionales, imágenes 2D, propiedades físicas y/o geométricas de los modelos virtuales como densidad, textura, rigidez, etc., y parámetros que modifican el escenario virtual, [38].

### 1.2.2 Módulo de visualización y renderizado gráfico

Este módulo es responsable de la representación gráfica de los objetos en el entorno virtual. La calidad de la representación gráfica de los objetos virtuales define el nivel de realismo que ofrece el sistema de VR [11, 12, 40, 43]. Se han desarrollado diversas tecnologías para sumergir al usuario en el entorno virtual con el fin de aumentar el nivel de realismo. Algunas de estas tecnologías inmersivas incluyen pantallas montadas en la cabeza (Head mounted display, HMD) [45], monitores con proyección estereoscópica o salas de realidad virtual (CAVE) [46].

La visualización en sistemas de realidad virtual no solo se refiere a la proyección de modelos virtuales al usuario, sino también a submódulos que brindan al sistema la capacidad de importar el modelo tridimensional [47]. Igualmente el módulo de visualización se encarga de representar gráficamente el resultado de la manipulación de los objetos virtuales y la simulación cinética, dinámica y la detección de colisiones entre los objetos virtuales [43]. Por lo tanto, el módulo de visualización trabaja en conjunto con todos los módulos que conforman al sistema de VR.

### 1.2.3 Módulo de simulación

El módulo de simulación integra herramientas que permiten efectuar en tiempo real el cálculo matemático concerniente al fenómeno físico que ocurre durante la interacción y manipulación de los objetos virtuales, como las ecuaciones de movimiento, el análisis dinámico y la detección de colisiones [48]. El módulo de simulación interactúa con señales de entrada provenientes de un hardware, como lo puede ser el ratón de computadora o sistemas diseñados para la inmersión del usuario en la VR [43].

Las herramientas de simulación virtual también conocidas como simuladores físicos (*Physics-engine*) han sido incorporadas en los videojuegos y cinematografía, y en los últimos años en los sistemas VR para incrementar el LoR y el nivel de inmersión del usuario [40, 48, 49]. Sin embargo, la integración del módulo de simulación en un sistema VR demanda un alto costo computacional por la necesidad de procesar el ciclo de cálculo del fenómeno físico de manera constante en fracciones de segundo. Además, el alto costo computacional que implica un simulador de física puede dar origen a una deficiente respuesta del sistema durante la manipulación e interacción de los objetos en la escena virtual. Por esta razón, diversos autores sugieren delimitar los fenómenos físicos a simular de acuerdo con la aplicación del sistema de realidad virtual sacrificando la precisión de los resultados [38, 40].

### 1.3 Sistemas de inmersión de usuario en la realidad virtual

En los sistemas de VR la inmersión del usuario ocurre mediante la generación computacional de estímulos multisensoriales que se entregan al usuario [36, 50]. El tipo y la calidad de estos estímulos generados determinan el nivel de inmersión y la sensación de presencia que provee el ambiente virtual [49, 51]. De manera ideal el usuario debe percibir una alta calidad y resolución de estímulos sensoriales generados por la computadora, los cuales deben estimular todos los sentidos humanos. Sin embargo, en la práctica solo uno o unos pocos de los sentidos son estimulados siendo el sentido de la vista la principal modalidad sensorial que brinda a los usuarios la sensación del mundo real en el ambiente virtual [17]. De acuerdo a [52] y [11], existen tres grados de inmersión virtual:

- Sistemas no inmersivos (de escritorio). Emplean como dispositivos de entrada el ratón de computadora, teclado, joysticks de juegos o trackballs. Como dispositivo de salida se emplea un monitor estándar de alta resolución, por lo que el nivel de inmersión del usuario es bajo. Los sistemas no inmersivos son los que se pueden construir a un bajo costo, ya que el hardware empleado suele ser el usado por los equipos de cómputo de oficina.
- Sistemas semi-inmersivos. Usan joysticks diseñados para una aplicación específica, o sistemas de retroalimentación táctil como dispositivos hápticos o guantes de datos para permitir la interacción del usuario con los objetos virtuales, Figura 1.2 (a). Como dispositivos de salida emplean monitores que permiten la proyección estereoscópica de los objetos virtuales simulando una ventana hacia la realidad virtual, Figura 1.2(b).
- Sistemas completamente inmersivos. Permiten la inmersión visual del usuario mediante una pantalla montada en la cabeza, Figura 1.2(c) [53]; o una CAVE, Figura 1.2 (d) [54]. La manipulación de objetos virtuales se puede realizar mediante joysticks de juego o dispositivos hápticos. Algunos sistemas permiten los comandos de voz y ofrecen sonido envolvente para generar estímulos auditivos.

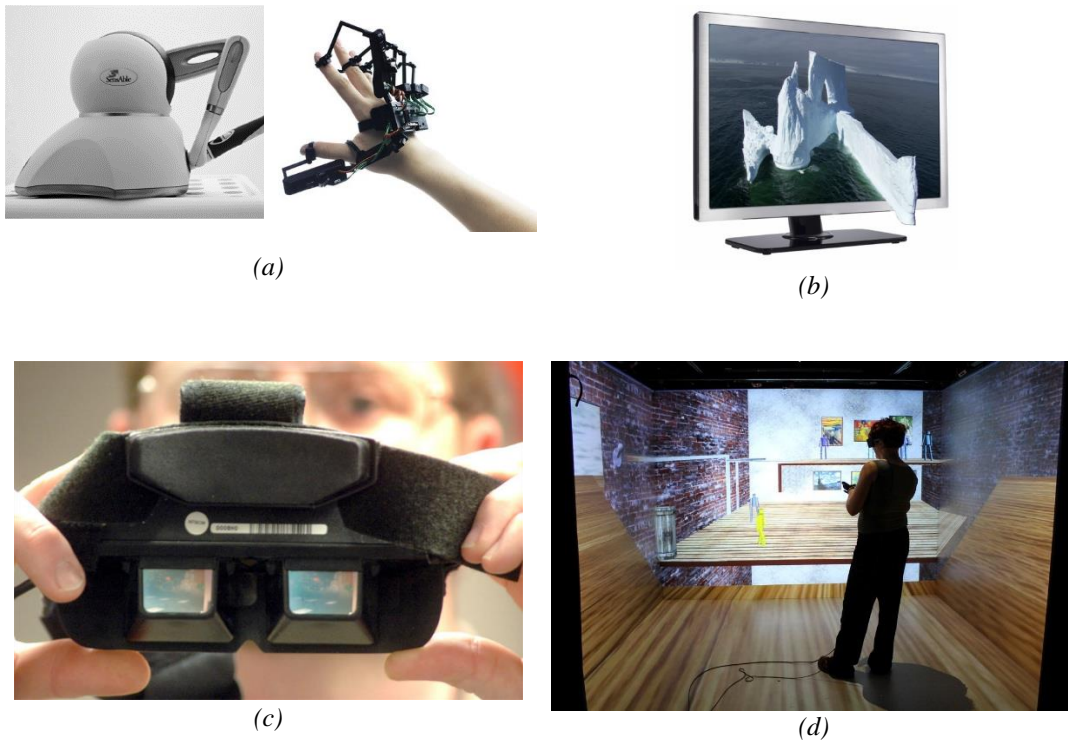


Figura 1.2 Dispositivos de inmersión de usuario: (a) dispositivos hápticos de escritorio y guante, (b) monitores de proyección tridimensional, (c) pantallas para montaje en cabeza o head mounted display (HMD), (d) cabina de ambiente virtual, CAVE.

A pesar de que en [11] se identifica el sistema completamente inmersivo como el nivel más alto de inmersión hacia el usuario, también se menciona que en la actualidad no existe un sistema que brinde una inmersión total de todos los sentidos humanos. Por lo tanto, la inmersión más común refiere a la generación de estímulos visuales y táctiles los cuales son suficientes para lograr en el usuario la percepción de presencia en la realidad virtual [17].

#### 1.4 Sistemas hápticos

Los sistemas hápticos son una tecnología de transferencia bidireccional que permite la interacción táctil del usuario con objetos virtuales o remotos [55]. Mediante el uso de interfaces hápticas el usuario puede manipular, sentir y tocar libremente los objetos de la escena virtual y recibir retroalimentación de fuerza [56]. La retroalimentación recibida por el usuario, refiere al valor de resistencia real de la acción efectuada por el usuario sobre el dispositivo y los objetos virtuales simulando que la acción se realiza en un ambiente real [57].

El funcionamiento de un dispositivo háptico sigue la secuencia que se muestra en la Figura 1.3, donde el cerebro humano brinda información a los músculos para manipular el efector final del dispositivo háptico. El efector final tiene diversos sensores que detectan el ángulo y la fuerza aplicada, la cual es recibida por la computadora y renderizada en el ambiente virtual. Una vez recibida la información, ésta es procesada de acuerdo con el comportamiento físico definido en el ambiente virtual, y retroalimentada de manera táctil al usuario mediante el accionamiento de los actuadores del dispositivo háptico. Los actuadores aplican una determinada fuerza al efector final del dispositivo, la cual se hace presente sobre las articulaciones del usuario y es percibida por el cerebro como estímulo de fuerza [58].



Figura 1.3 Secuencia de funcionamiento de un dispositivo háptico.

Dentro de los dispositivos hápticos se encuentran los de fuerza/par, los cuales están orientados para detectar las reacciones de contacto durante la interacción con los objetos virtuales. Por otro lado, los dispositivos táctiles están orientados a detectar sensaciones relacionadas con los receptores de la piel (por ejemplo, la temperatura de la superficie, la rugosidad de la superficie, etc.). Las tecnologías hápticas se han integrado en aplicaciones de realidad virtual para permitir al usuario la interacción con los objetos virtuales, [17].

Diversas aplicaciones de realidad virtual en el área de modelado tridimensional, diseño, fabricación, escultura, teleoperación, juegos y entretenimientos, tienen tecnologías hápticas integradas. En medicina, la realidad virtual y las tecnologías hápticas se han integrado para permitir el desarrollo de simuladores quirúrgicos para la planificación y capacitación de procedimientos quirúrgicos en las áreas de otorrinolaringología, gastroenterología, urología, neumología, etc. [59].

#### 1.4.1 Renderizado háptico

El renderizado háptico es el proceso de generar y calcular las fuerzas de retroalimentación en respuesta a la interacción del usuario con el objeto virtual [60]. Siendo el renderizado háptico una de las partes más importantes dentro de la interfaz háptica, un sistema de VR asistido por sistemas hápticos debe tener la capacidad de representar los elementos del escenario, objetos y sus propiedades físicas y volumétricas de manera apropiada. Además, debe permitir la visualización de la manipulación de los objetos por medio del renderizado gráfico [58]. La arquitectura típica de un sistema de VR que emplea interfaces hápticas se muestra en la Figura 1.4.

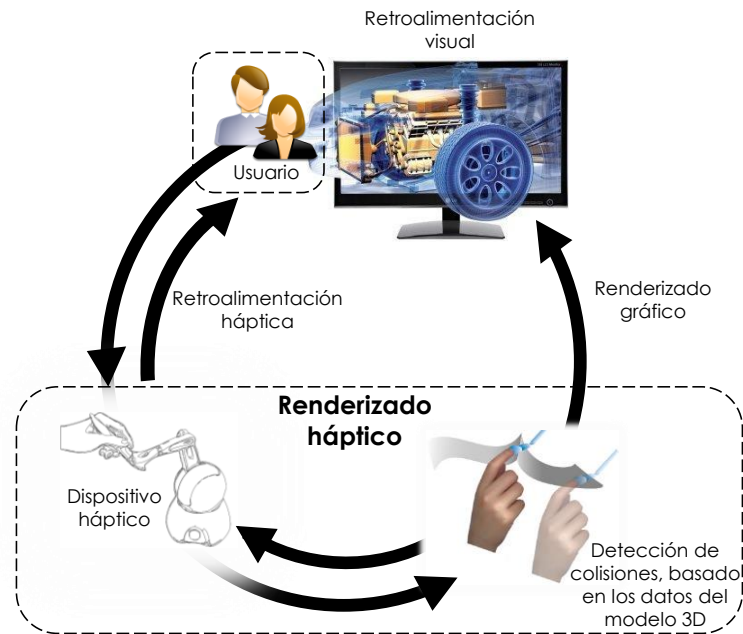


Figura 1.4 Arquitectura de un sistema de VR que emplea interfaces hápticas.

Para la generación y cálculo de fuerzas de retroalimentación al usuario se emplean algoritmos de renderizado háptico, los cuales detectan las colisiones y dan respuesta a las colisiones que ocurren entre los objetos virtuales y/o el cursor háptico. La detección de colisiones se efectúa mediante métodos que se basan en encerrar el modelo virtual en una figura primitiva, como puede ser una esfera, cubo o polígono de acuerdo con el tamaño y forma de la geometría virtual [61]. Con la finalidad de mantener la sensación del objeto virtual se debe tener una velocidad de actualización del renderizado háptico de al menos 1kHz. La Figura 1.5 presenta de manera general el ciclo de renderizado háptico [58, 61].

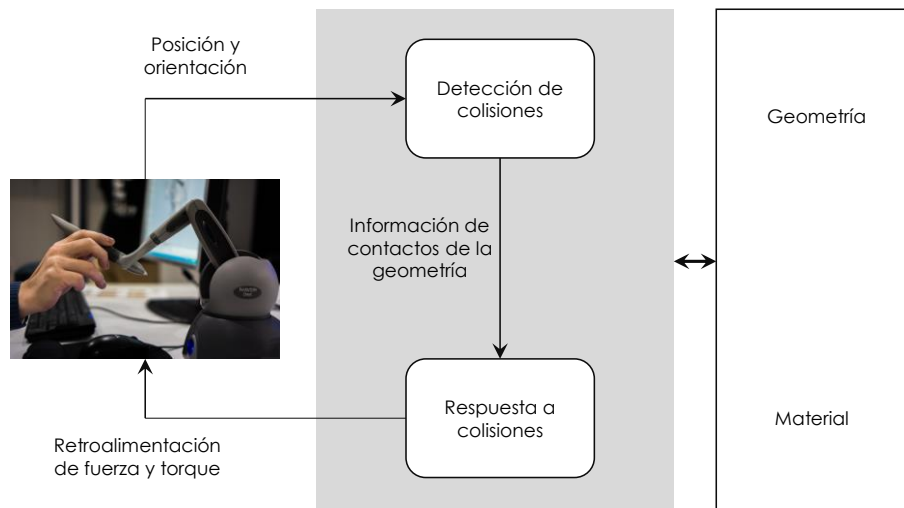


Figura 1.5 Ciclo de renderizado háptico.

El cálculo de la fuerza de reacción que siente el usuario al manipular los objetos en el ambiente virtual-háptico se puede realizar usando diferentes métodos, entre los más conocidos son el método del elemento finito (Finite element method, FEM), el sistema masa-resorte (Mass-spring system, MS) y el sistema masa-resorte-amortiguador (Mass-spring-damper system, MSD), Figura 1.6. El primer método discretiza la geometría en subregiones representadas por elementos de geometría definida y finitamente pequeños. Este método se basa en aproximar una función continua de un modelo compuesto por diversos elementos, los cuales están a su vez definidos por otra función continua [60]. Por otro lado, en los métodos MS y MSD el objeto virtual se divide en mallas (triangulares, poligonales), donde a cada vértice del elemento se le asigna una partícula de masa, y sobre cada arista se le asigna un resorte y amortiguador, según sea el caso, que conecta cada partícula de masa. El modelo MS es muy popular debido a su facilidad y simplicidad de modelado matemático y bajo costo computacional, [60, 61].

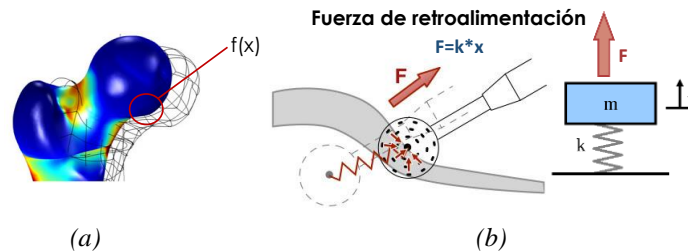


Figura 1.6 Metodologías para el cálculo de fuerzas de retroalimentación en los sistemas hápticos: (a) método del elemento finito, (b) modelo masa-resorte.

## 1.5 Aplicaciones de la realidad virtual

La VR se ha incorporado en diferentes áreas como la milicia, medicina, ingeniería, visualización científica, construcción, educación, entretenimiento, astronomía, arqueología y arte, entre otras. En el área de la milicia la realidad virtual ha permitido la generación de simuladores para el entrenamiento en tareas de búsqueda y rescate [62-64]; y en la generación de simuladores de vuelo que han sido también incorporados en aplicaciones de aeronáutica comercial [65], Figura 1.7 (a). En el área de la ingeniería se han desarrollado sistemas que permiten simular tareas de ensamble [66, 67], modelado tridimensional [68], aplicaciones de simulación robótica y de fenómenos físicos para el diseño de nuevos productos, Figura 1.7(b,c) [69]. En la construcción la realidad virtual ha permitido verificar factores como la viabilidad estructural y el diseño arquitectónico sin necesidad de una inversión económica y tiempo de construcción, Figura 1.7 (d). Lo anterior ha llevado a compañías constructoras grandes a reducir la cantidad de errores que se encuentran presentes en el proceso de construcción y planeación de la construcción [70, 71]. En la educación la VR ha permitido que los estudiantes interactúen con datos complejos de manera accesible como el estudio de atlas anatómicos en medicina [72] o la exploración de ambientes naturales submarinos [73], Figura 1.7 (e,f). Además diversos estudios han comprobado que las aplicaciones de VR en la educación han logrado reducir la curva de enseñanza-aprendizaje de estudiantes en diversas áreas del conocimiento [74, 75]. La VR también ha dado pauta a la enseñanza de arte y la creación de museos virtuales los cuales permiten el aprendizaje y la interacción de los usuarios de la VR con las obras de arte virtuales [76]. En el área del entretenimiento la realidad virtual ha sido incorporada en la generación de videojuegos y producciones cinematográficas permitiendo a los espectadores interactuar con los entornos virtuales [77, 78]. En el área de la medicina se han creado entornos virtuales para permitir la interacción con la anatomía del cuerpo humano, la simulación, planeación y entrenamiento de procedimientos quirúrgicos, permitiendo mejorar los procesos clínicos y reduciendo los riesgos o problemas ocasionados por errores médicos [79].



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

*Figura 1.7 Aplicaciones de la realidad virtual: (a) simulador de vuelo virtual, (b) sistema de ensambles virtuales en ingeniería, (c) desarrollo de nuevos productos, (d) edificación virtual, (e) atlas anatómico virtual, (f) simulador de exploración submarina.*

## 1.6 Realidad virtual en aplicaciones médicas

La práctica de la medicina es un proceso complejo de toma de decisiones que requiere conocimiento, experiencia y habilidades manuales [8]. Las habilidades del profesional de la medicina se obtienen mediante el entrenamiento y la práctica profesional, lo cual es un proceso lento que puede tomar varios años. Para obtener experiencia y habilidades, un estudiante de medicina debe ser el protagonista de su formación, pero teniendo como principal prioridad evitar los riesgos y los inconvenientes innecesarios para el paciente [9]. En consecuencia, el uso de VR y tecnologías informáticas en medicina se ha convertido en una herramienta importante para que los estudiantes y profesionales comprendan y confirmen conceptos y mejoren sus

habilidades en la práctica quirúrgica. Igualmente para que los cirujanos experimentados planifiquen y hagan un diagnóstico más preciso [22, 80, 81].

Dentro de las aplicaciones de la VR en medicina se encuentra el desarrollo de sistemas de cirugía asistida por computadora (Computer aided surgery, CAS). Los sistemas CAS emplean herramientas modernas de ingeniería que permiten la planeación y simulación de procedimientos quirúrgicos, y el diseño de prótesis e instrumentos de asistencia médica [15, 82, 83]. Las técnicas modernas de ingeniería como el diseño asistido por computadora; ingeniería asistida por computadora (Computer aided engineering, CAE); procesamiento de imágenes y reconstrucción 3D; ingeniería inversa (Reverse engineering, RE); robótica y visión artificial; realidad virtual y realidad aumentada (Augmented reality, AR); y manufactura aditiva (Additive manufacturing, AM), se han creado y desarrollado para contribuir al desarrollo de la industria. Sin embargo, el uso de estas tecnologías de la ingeniería en aplicaciones médicas para la prestación de servicios de salud humana, ha aumentado significativamente en las últimas tres décadas [27]. Como consecuencia, la cirugía asistida por ingeniería (Engineering assisted surgery, EAS) se ha introducido como un nuevo campo de investigación, y se define como la aplicación de tecnologías de ingeniería y manufactura para el cuidado de la salud [84]. La EAS comprende la adquisición de datos a partir de escáneres tridimensionales como la tomografía computarizada (Computer tomography, CT), o la resonancia magnética (Magnetic resonance imaging, MRI), la manufactura aditiva, el CAD, la ingeniería inversa y el análisis por elementos finitos (Finite element analysis, FEA). El objetivo principal de la EAS es mejorar los procesos convencionales de atención y cuidados médicos mediante sistemas y tecnologías digitales [84, 85].

Las aplicaciones típicas de las tecnologías de ingeniería en medicina incluyen la visualización y reconstrucción de la anatomía humana; modelado de órganos y tejidos; simuladores quirúrgicos para planificación y capacitación; cirugía robótica; locomoción y análisis de la marcha; y diseño y fabricación de prótesis, implantes, biomodelos, andamios tisulares, modelos de entrenamiento y herramientas de asistencia quirúrgica. La Figura 1.8 muestra algunas aplicaciones de la realidad virtual en medicina [86-88].



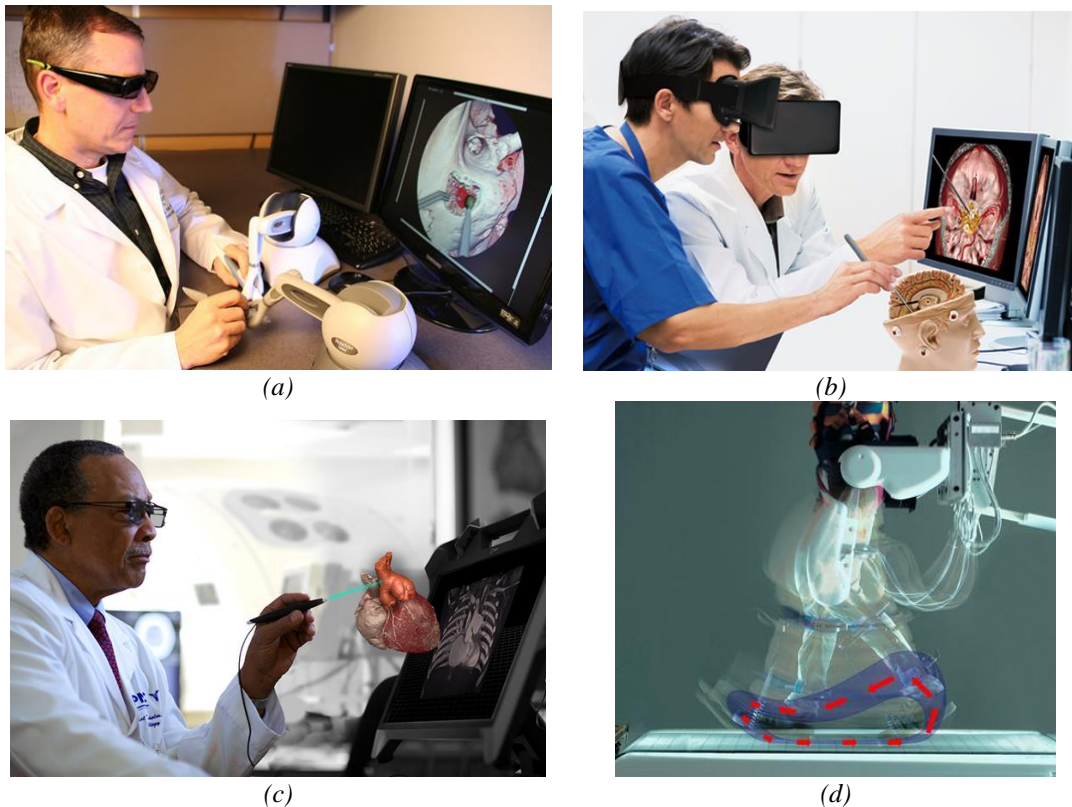


Figura 1.8 Aplicaciones de la realidad virtual, (a) simulación quirúrgica, (b) planeación preoperatoria, (c) modelado de órganos, (d) análisis del caminar humano.

Dentro de las herramientas de ingeniería el diseño asistido por computadora y la fabricación asistida por computadora se han incorporado a los sistemas virtuales para permitir el diseño y la fabricación de herramientas de asistencia médica e implantes [89-91]. Sin embargo, los sistemas comerciales que integran herramientas de ingeniería pueden ser muy costosos. Por esta razón, los especialistas médicos han decidido usar herramientas CAD/CAM de forma independiente; pero esta práctica requiere especialistas en ingeniería o la capacitación de cirujanos en el uso de técnicas de ingeniería, que aumentan el tiempo y el costo del proceso de planificación quirúrgica.

Algunos trabajos de investigación han integrado herramientas de ingeniería para el diseño y fabricación de herramientas, guías quirúrgicas, prótesis e implantes para aplicaciones médicas. Otros trabajos han validado el uso de software comercial, como (Materialise®), para diseñar y fabricar herramientas de asistencia médica tal como férulas oclusales 3D para cirugías ortognáticas [92-94]. Al igual que Materialise®, Geomagic® ofrece software comercial para la generación de plantillas quirúrgicas para el segmentado y reposicionamiento óseo de los huesos maxilares [95]. Los trabajos de investigación también se han centrado en el desarrollo de sistemas informáticos de propósito específico como el reportado en [96], donde se describe el desarrollo del sistema EasySplint, que permite la generación de férulas quirúrgicas para cirugía maxilar a partir de modelos virtuales de maxilares previamente reposicionados.

Durante las últimas dos décadas, los esfuerzos de investigación del uso de la realidad virtual han demostrado su capacidad para reducir el tiempo de planeación de procedimientos quirúrgicos y, en la mejora del proceso enseñanza-aprendizaje de estudiantes de medicina [83, 97-102]. La Tabla 1.1 resume las características clave

de algunos sistemas de VR enfocados a la medicina que se han reportado en la literatura. Algunas de las áreas de aplicación de la realidad virtual en la medicina son:

- Planificación y capacitación quirúrgica [103, 104].
- Educación médica.
- Telecirugía y telemedicina.
- Pruebas del paciente.
- Pantallas anatómicas con fusión de datos en tiempo real.
- Rehabilitación [105-107].
- Soluciones de discapacidad.
- Simulación y entrenamiento quirúrgico [19].
- Planificación quirúrgica [108].
- Modelado de órganos [15].
- Diseño virtual y fabricación de dispositivos médicos [109].

*Tabla 1.1 Características de algunos sistemas de realidad virtual enfocados a la medicina.*

<b>Autor/Sistema</b>	<b>Tipo de Sistema VR</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Características principales</b>
Müller et al., [110]	NI-VR	Simulador quirúrgico para angiología y cirugía vascular	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Emplea mecánica de fluidos computacional (CFD) para simular el flujo sanguíneo.</li> <li>- Dispone de modelos virtuales de arterias precargados.</li> <li>- El instrumental quirúrgico virtual es controlado por un simple mouse de computadora.</li> </ul>
Reitinger et al. [111]	SI-VR	Planeación quirúrgica para cirugía de hígado	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dispone de retroalimentación háptica.</li> <li>- Los modelos vasculares y de hígado son obtenidos a partir de la reconstrucción tridimensional de datos provenientes de la CT. Los modelos virtuales son deformables a partir de las propiedades mecánicas del hígado.</li> <li>- Permite la segmentación de modelos virtuales.</li> </ul>
Maxilim@.,[112]	NI-VR	Planeación quirúrgica para ortodoncia y cirugía ortognática	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite la visualización 3D del paciente.</li> <li>- Permite el segmentado y reposicionamiento de modelos 3D.</li> <li>- Integra herramientas CAD para la generación de plantillas quirúrgicas.</li> <li>- Genera un reporte de reposicionamiento maxilar.</li> </ul>
Gélinas et al. [113]	SI-VR	Entrenamiento en cirugía vascular	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integra estructuras anatómicas 3D precargadas para cirugía vascular.</li> <li>- Dispone de retroalimentación háptica de hasta dos dispositivos de forma simultánea.</li> </ul>
Rhienmora et al., [114]	SI-VR	Entrenamiento en procedimientos dentales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos dentales se obtienen a partir de la CT.</li> <li>- Integra retroalimentación háptica.</li> <li>- Permite el fresado y taladrado virtual de las estructuras dentales.</li> </ul>
Tolsdorff et al., [115]	SI-VR	Simulador para cirugía paranasal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos son creados a partir de la CT.</li> <li>- Los modelos de tejidos blandos son integrados de forma manual.</li> <li>- Los modelos pueden manipularse con herramientas quirúrgicas virtuales controladas por un dispositivo háptico y</li> <li>- La remoción de tejido es representada gráficamente.</li> </ul>
Vankipuram et al., [116]	SI-VR	Simulador de cirugía ortopédica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelos virtuales adquiridos de CT y/o MRI.</li> <li>- Integra retroalimentación háptica.</li> <li>- Simula el proceso de taladrado manual empleando el sistema háptico.</li> </ul>
Ni et al., [117]	SI-VR	Simulador en cirugía ultrasónica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Extracción y reconstrucción de modelos 3D a partir de la CT.</li> <li>- Integra la retroalimentación háptica multidispositivos.</li> </ul>

NI-VR: Realidad virtual no inmersiva, SI-VR: Realidad virtual semi-inmersiva, FI-VR: Realidad virtual completamente inmersiva.

Tabla 1.1 Características de algunos sistemas de realidad virtual enfocados a la medicina, (continuación).

Autor/Sistema	Tipo de Sistema VR	Aplicación	Características principales
Iwata et al., [118]	SI-VR	Entrenamiento en cirugía laparoscópica	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contiene modelos anatómicos 3D precargados empleados en cirugía laparoscópica, ginecología y cirugía general.</li> <li>- Integra retroalimentación háptica.</li> <li>- El dispositivo háptico se basa en los instrumentos reales empleados en laparoscopia.</li> </ul>
Delorme et al., [119]	SI-VR	Simulador para neurocirugía	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El modelo virtual del paciente es obtenido a partir de la CT.</li> <li>- Permite la retroalimentación háptica.</li> <li>- Integra la simulación cinemática y dinámica del instrumental médico.</li> <li>- Permite la reconstrucción virtual de tejidos blandos.</li> </ul>
Linte et al., [120]	NI-VR	Planeación en cirugía espinal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los modelos virtuales son reconstruidos a partir de la CT.</li> <li>- El sistema propone plantillas 3D precargadas las cuales se adaptan al paciente para definir la nueva posición vertebral.</li> <li>- Las plantillas 3D generadas son exportadas en formato STL para ser fabricadas por manufactura aditiva.</li> </ul>
GI Mentor TM, [121]	SI-VR	Entrenador quirúrgico para endoscopia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contiene estructuras 3D gastrointestinales precargadas.</li> <li>- Integra retroalimentación háptica.</li> <li>- Simula el corte y remoción de tejido blando empleando el sistema háptico.</li> </ul>
URO-PERC MentorTM, [122]	NI-VR	Entrenador quirúrgico para urología	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incluye un torso maniquí.</li> <li>- Contiene estructuras anatómicas virtuales precargadas.</li> <li>- Permite la simulación gráfica del corte de tejidos blandos.</li> </ul>
NOViSE, [123]	SI-VR	Simulador de endoscopia	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Integra la retroalimentación de fuerza a partir de una interfaz de computadora.</li> <li>- El sistema captura los movimientos de la interfaz háptica y calcula en tiempo real el movimiento del endoscopio virtual.</li> <li>- Integra tareas de navegación y corte virtual.</li> </ul>

NI-VR: Realidad virtual no inmersiva, SI-VR: Realidad virtual semi-inmersiva, FI-VR: Realidad virtual completamente inmersiva.

En los sistemas de realidad virtual presentados en la Tabla 1.1, se observa que en su mayoría se enfocan a la simulación y/o planificación de procedimientos quirúrgicos en diversas áreas de la medicina. La aplicación de la realidad virtual en la planeación y simulación quirúrgica ha hecho posible que cirujanos efectúen el procedimiento quirúrgico previo a la sala operatoria en un ambiente virtual y utilizando la información tridimensional del paciente, adquirida de la CT o MRI. Además, el uso de la realidad virtual en la simulación quirúrgica permite reducir la posibilidad de que el cirujano dañe tejidos sanos durante el procedimiento quirúrgico real, al permitir que el médico explore la anatomía del paciente previo a la cirugía.

Dentro las aplicaciones médicas de VR presentadas en la Tabla 1.1, éstas son capaces de adquirir la información del paciente proveniente de escáneres médicos o contienen información precargada de casos clínicos dando la posibilidad al cirujano entrenar distintos procedimientos quirúrgicos. A partir de la integración de simuladores de física en la VR y dispositivos de inmersión de usuario, se ha logrado que el médico sienta y manipule los tejidos virtuales como sucede en el mundo real. Conjuntamente, los dispositivos de inmersión de usuario han permitido que médicos mejoren sus habilidades quirúrgicas gracias a la incorporación de la interfaz háptica de retroalimentación de fuerza. Por lo tanto, la integración de los sistemas de inmersión de usuario y retroalimentación de fuerza en aplicaciones virtuales enfocadas a la medicina dan la pauta para que los sistemas VR sean empleados como herramientas de simulación quirúrgica y planeación preoperatoria.

### 1.6.1 Desarrollo de aplicaciones médicas en realidad virtual.

En el desarrollo de sistemas de realidad virtual enfocados en aplicaciones médicas, se identifican cinco módulos que deben considerarse: 1) el módulo de reconstrucción del modelo, 2) el módulo de visualización, 3) módulo de manipulación 4) módulo de simulación, and 5) módulo de información médica. Estos módulos conforman, la arquitectura general propuesta para el desarrollo de aplicaciones médicas asistidas por la realidad virtual, **Error! Reference source not found.**, y se describen a continuación:



Figura 1.9 Arquitectura general de un sistema VR en aplicaciones médicas.

#### **Módulo de reconstrucción del modelo**

Este módulo es responsable de la generación del modelo 3D del paciente a partir de imágenes médicas obtenidas de la tomografía computarizada o resonancia magnética. Diversos sistemas comerciales y de arquitectura abierta se han desarrollado para llevar a cabo la reconstrucción tridimensional de imágenes médicas, entre estos sistemas se encuentran: 3DSlicer [124], ITK-SNAP [125], TurtleSeg [126], y Dolphin Imaging [127]. Además, se han propuesto metodologías y algoritmos para la reconstrucción 3D de imágenes. Los algoritmos de reconstrucción 3D propuestos se basan en la aproximación de la geometría a partir de un conjunto de puntos 3D (cloud points) para generar una malla. La malla generada representa la geometría externa de la anatomía del paciente [128]. Otros algoritmos propuestos incluyen información adicional de la anatomía del paciente como las propiedades mecánicas de los tejidos o la densidad ósea [129]. Los algoritmos que incluyen la información de la propiedades de los tejidos emplean voxels, marching cubes u octrees para representar la anatomía del paciente en el entorno virtual [130, 131].

#### **Módulo de visualización**

Este módulo es responsable del renderizado gráfico de los objetos en la escena virtual. La calidad de la representación gráfica define el nivel de realismo del ambiente virtual. Además, se han desarrollado tecnologías que envuelven al usuario en la realidad virtual, llamadas tecnologías inmersivas e incrementan el nivel de realismo de la VR. Dentro de las tecnologías inmersivas se encuentran: los monitores de montaje para la cabeza (head-mounted display, HMD) [132, 133], monitores con proyección estereoscópica y las cabinas de realidad virtual (CAVE) [134]. El módulo de visualización en los sistemas de realidad virtual no solo involucra la proyección de los modelos virtuales al usuario, sino que también toma en cuenta la proyección de la manipulación de los objetos virtuales. En aplicaciones médicas, el módulo de visualización involucra la representación visual de los procedimientos médicos, la manipulación de los modelos anatómicos, el instrumental quirúrgico y el resultado de la manipulación de la anatomía virtual del paciente. Por lo tanto, el módulo de visualización trabaja en conjunto con los módulos de reconstrucción, el módulo de manipulación y el módulo de simulación.

### ***Módulo de manipulación***

Este módulo permite la interacción del usuario con los objetos del ambiente virtual. Uno de los principales requerimientos de las aplicaciones médicas que emplean VR es la brindar al usuario la capacidad de interacción con la anatomía del paciente de forma visual, táctil y sonora. La interacción se logra mediante la generación de estímulos sensoriales hacia el usuario, empleando monitores, dispositivos hápticos y sistemas de sonido envolvente, respectivamente. La sensación de manipulación de los objetos virtuales se obtiene integrando las propiedades físicas de los objetos a la escena virtual; en conjunto con el cálculo y representación del fenómeno físico que ocurre durante la manipulación. La representación del fenómeno físico involucra el cálculo de fuerzas, las cuales son retroalimentadas al usuario mediante el dispositivo háptico. Además, el módulo de manipulación puede integrar herramientas CAD con la finalidad de efectuar el diseño de plantillas quirúrgicas, implantes o prótesis a partir de los modelos virtuales.

### ***Módulo de simulación***

Este módulo permite la simulación de procedimientos médicos como el corte, taladrado, fresado de hueso, entre otros. El módulo simulación integra el modelo matemático del fenómeno físico que ocurre durante el procedimiento quirúrgico virtual. Dentro del módulo de simulación es posible integrar herramientas de Manufactura Asistida por Computadora (CAM) las cuales permiten simular el proceso de fabricación de herramientas de asistencia quirúrgica, implantes o prótesis empleadas por el cirujano en el procedimiento quirúrgico real.

### ***Módulo de información médica***

Este módulo es responsable del análisis y obtención de la información médica generada por el sistema de VR. El procesamiento de la información médica es relevante para llevar a cabo tareas de entrenamiento, simulación y planeación de procedimientos médicos en el ambiente virtual. Las aplicaciones médicas que emplean VR deben tener la capacidad de extraer información útil al médico, para su uso por el especialista durante la cirugía real; como: la secuencia de operaciones, uso de plantillas quirúrgicas, posición de suturas, desplazamientos óseos, entre otros. Además, dentro del entrenamiento quirúrgico virtual, el sistema debe ser capaz de extraer la información del desempeño del médico, así como monitorizar su progreso.

## **1.7 Discusión**

Los avances en la realidad virtual han permitido el desarrollo de aplicaciones informáticas orientadas a la asistencia de médicos en tareas como la planificación quirúrgica, el entrenamiento y simulación de procedimientos médicos, el modelado de órganos, el diseño de prótesis y dispositivos de asistencia médica, entre otros. Tradicionalmente estas tareas dependen del desarrollo del conocimiento y las habilidades manuales adquiridas por el médico tras varios años, lo cual origina que un médico poco experimentado llegue a poner en riesgo la integridad del paciente. A diferencia del uso de maniqués y cadáveres, que involucran un alto costo, los sistemas basados en la realidad virtual ofrecen una alternativa viable para que el médico en entrenamiento adquiera las habilidades manuales y el conocimiento para la práctica real. Adicionalmente se observa que mediante el uso de la VR es posible repetir el entrenamiento de procedimientos quirúrgicos tantas veces sea necesario sin poner en riesgo al paciente, pudiendo simular diversas patologías y analizar el riesgo de cada procedimiento quirúrgico de forma previa al procedimiento real. Por lo tanto, los sistemas de VR orientados a la medicina son una herramienta útil para la práctica y entrenamiento médico.



## Capítulo 2. Fundamentos de la cirugía ortognática

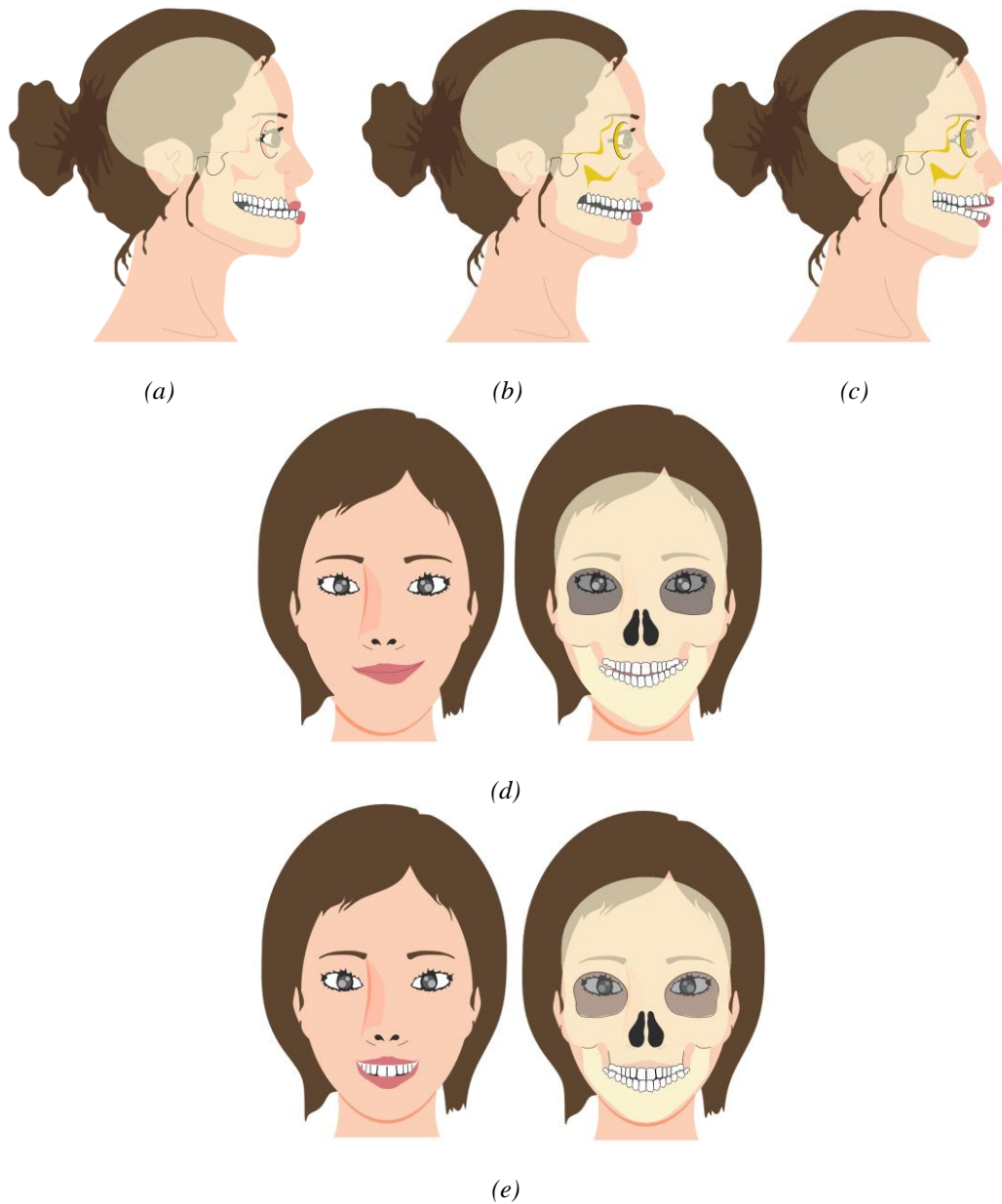
En este capítulo se describen las etapas del proceso de planeación de cirugía ortognática de forma tradicional y el estado del arte de las herramientas virtuales de planeación quirúrgica que se han desarrollado, así como su alcance dentro de las distintas fases del proceso de planeación preoperatoria.

### 2.1 Cirugía ortognática

Dentro de los procesos médicos más complejos se encuentra el tratamiento de patologías congénitas y adquiridas del cráneo, cara, cavidad oral y maxilares; las cuales son atendidas por especialistas en cirugía oral y maxilofacial [4]. El tratamiento y corrección de estas patologías exige una extensa y precisa planeación quirúrgica que garantice que el médico obtenga los resultados deseados [1, 135]. Un modelo de este tipo de procedimientos es la cirugía ortognática, la cual busca corregir malformaciones y la desalineación ósea de los maxilares modificando la oclusión dental o mordida del paciente [1, 3, 136].

De acuerdo con estudios realizados al 2010 entre un 12 y 17 por ciento de la población mundial padece algún problema de desalineación maxilar [1]. Entre los problemas de desalineación maxilar corregidos por la cirugía ortognática, se encuentran los que se detallan a continuación [1, 3], Figura 2.1.

- *Prognatismo mandibular*. Es una discrepancia entre la proyección de los maxilares en diferentes circunstancias, cuando el maxilar superior es deficiente o el inferior excesivo [137], Figura 2.1(a).
- *Retrognatismo mandibular*. Se refiere a la posición retrasada de la mandíbula o de los dientes. Es una alteración que deforma la cara en donde la mandíbula es muy pequeña por la falta de proyección [137, 138], Figura 2.1(b).
- *Mordida abierta*. Es una patología en la que los maxilares han crecido de forma divergente resultando en que los dientes anteriores y en ocasiones los posteriores no se acoplen entre sí [139], Figura 2.1(c).
- *Asimetría*. La asimetría cráneo-facial se expresa como la diferencia en tamaño o relación entre dos partes de la cara. Esto puede ser el resultado de discrepancias en la forma de los huesos o en la malposición de uno o más huesos del complejo maxilofacial [140], Figura 2.1(d).
- *Sonrisa gingival*. Es la condición donde se exponen una mayor cantidad de encía maxilar superior y tienen una relación desproporcionada con la dentadura, esta relación obedece a mostrar más de 2 mm del tejido gingival. La sonrisa gingival se da por el crecimiento y desarrollo excesivo, en sentido vertical, del hueso maxilar superior o por una excesiva erupción dental [141], Figura 2.1(e).



*Figura 2.1 Problemas de desalineación maxilar corregidos por cirugía ortognática: (a) prognatismo mandibular u oclusión clase III, (b) retrognatismo mandibular u oclusión clase II, (c) mordida abierta, (d) asimetría facial, (e) sonrisa gingival.*

Los problemas de desalineación maxilar son reflejados en la oclusión o mordida del paciente. La oclusión es la relación que existe entre la dentadura maxilar y mandibular, por lo cual esta relación es empleada para catalogar de manera previa el tipo de malformación maxilar a partir de la clase de oclusión que presenta el paciente [142, 143]. Edward Angle identificó tres tipos de oclusión los cuales son [144, 145]:



1. *Oclusión clase I*. Es el tipo de oclusión idónea donde existe una relación en línea recta entre los molares y caninos superiores e inferiores. Figura 2.2 (a) [146].
2. *Oclusión clase II*. Presentada por pacientes diagnosticados con retrognatismo mandibular. Los molares y caninos inferiores se encuentran detrás de sus correspondientes maxilares. Figura 2.2 (b) [146].
3. *Oclusión clase III*. Oclusión característica de pacientes con prognatismo mandibular ya que los molares y caninos inferiores se encuentran en una posición proyectada respecto a sus equivalentes maxilares. Figura 2.2 (c) [146].

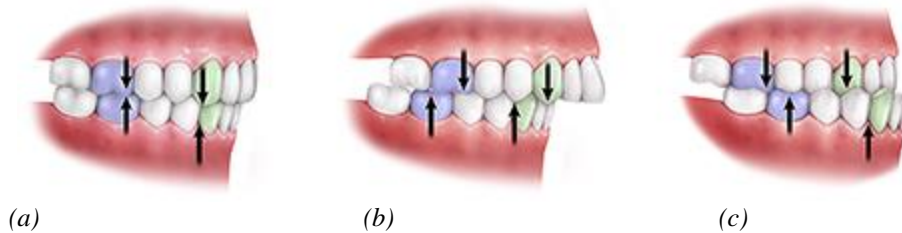


Figura 2.2 Clases de posición oclusal: (a) oclusión clase I, (b) oclusión clase II, (c) oclusión clase III.

El tratamiento de los problemas de desalineación maxilar corregidos por la cirugía ortognática no solo se lleva a cabo con la finalidad de lograr la armonía facial. Uno de los objetivos de tratamiento ortognático es la prevención del desarrollo de padecimientos médicos que ponen en riesgo la calidad de vida del paciente [147]. Dentro de los padecimientos que se desarrollan por la desalineación maxilar se encuentran los relacionados a la obstrucción de la vía aérea repercutiendo en amigdalitis, faringitis, rinitis alérgica, y apnea del sueño la cual puede desencadenar en enfermedades cardiacas. Los problemas funcionales de deglución y fonación también forman parte de los padecimientos de salud que conllevan las malformaciones maxilares [25, 148, 149].

El tratamiento de la desalineación maxilar por cirugía ortognática requiere ser planeado por un grupo de especialistas en ortodoncia y cirugía maxilofacial, por lo que resulta ser costoso. La planeación, valoración y evaluación quirúrgica por lo general representan el 69% del costo total del tratamiento, de lo cual 25% está relacionado a la manufactura de consumibles y herramientas de asistencia quirúrgica (plantillas, moldes, etc.) [150].

Una cirugía típica, de un solo maxilar requiere más de 13 horas efectivas de planeación, análisis y evaluación, y un mínimo de 4 horas en quirófano. Lo anterior sin considerar el proceso de ortodoncia previo a la planeación quirúrgica, el cual se realiza por un tiempo de 18 a 24 meses. Por lo tanto, si se pudiera reducir el tiempo de la planeación quirúrgica, se podrían reducir gradualmente los costos del tratamiento el cual asciende a \$150 000.00 pesos mexicanos [150, 151].

## 2.1 Procedimiento quirúrgico ortognático

El proceso quirúrgico general de la cirugía ortognática se basa en la alineación maxilar a partir del seccionado óseo [152]. El seccionado óseo se logra mediante la fractura de la parte media de la cara involucrando el hueso maxilar, o mediante la fractura mandibular o del mentón. A partir del segmento óseo fracturado, éste es reposicionado de acuerdo con el desplazamiento estimado durante el proceso de planeación quirúrgica. Posteriormente el segmento óseo es inmovilizado en su posición correcta con ayuda de placas de fijación ósea y una férula quirúrgica sobre la cual se graba la nueva oclusión o mordida del paciente de forma previa [3, 135, 136]. La férula quirúrgica asiste al médico durante la cirugía ya que sobre ella se encuentra implícito el resultado de la planeación quirúrgica [28]. Por lo tanto, un proceso erróneo de planeación ortognática conlleva a obtener una férula quirúrgica imprecisa; por consecuencia un resultado quirúrgico insatisfactorio [147].

La Figura 2.3 muestra la placa de fijación ósea al igual que la férula quirúrgica empleadas durante la cirugía ortognática [135].

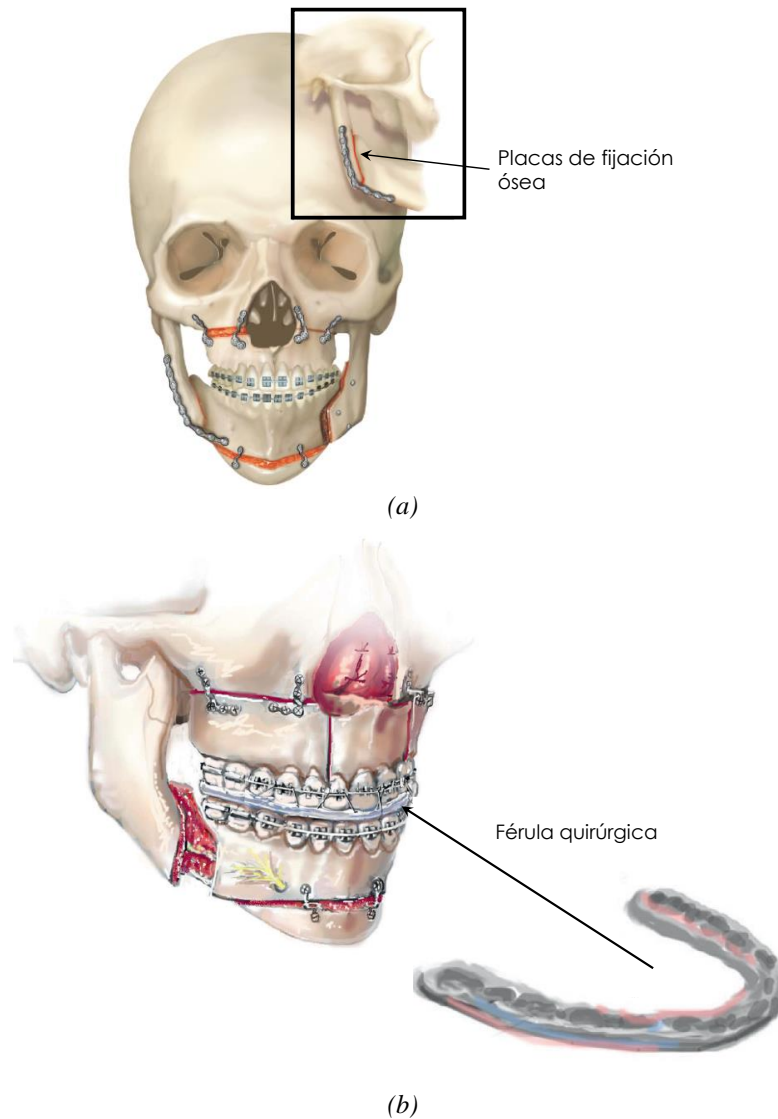


Figura 2.3 Herramientas de fijación ósea y asistencia quirúrgica empleadas en la cirugía ortognática: (a) placas de fijación ósea, (b) férula quirúrgica.

En la cirugía ortognática se identifican al menos cuatro distintos patrones de fractura ósea los cuales buscan resolver las distintas variantes de desalineación maxilar [136]. El patrón de fractura ósea es determinado por el cirujano durante la fase de planeación quirúrgica y diagnóstico, siendo los más usuales los que se describen a continuación y se muestran en la Figura 2.3.

1. *Le Fort I*. Es uno de los tipos de fractura más comunes en procedimientos ortognáticos para la corrección de malformaciones faciales. La fractura es empleada para el desplazamiento maxilar en tres dimensiones incluyendo la proyección, retrusión, elongación y recorte en longitud maxilar. Lo anterior permite tratar desalineaciones maxilares como el prognatismo mandibular cuando el maxilar se encuentra retraído, retrognatismo mandibular cuando el maxilar se encuentra proyectado y sonrisa

gingival [3]. La fractura se genera de forma pseudo horizontal a partir de la base nasal inferior hasta los extremos del seno maxilar y cresta alveolar de la arcada dental superior [153, 154]. La Figura 2.4 (a) muestra una reconstrucción de la fractura LeFort I.

2. *LeFort II*. Es una fractura de tipo piramidal empleada para corregir malformaciones de la región media facial. La fractura se genera partiendo del puente nasal afectando el borde orbital inferior y la pared media maxilar hasta los extremos del seno maxilar y cresta alveolar de la arcada dental superior [154]. La Figura 2.3 (b) muestra la sección ósea generada por la fractura LeFort II.
3. *Osteotomía sagital de rama mandibular*. También conocida como BSSO (bilateral sagittal split osteotomy) u Obwegeser Dal Pont es la fractura ortognática más empleadas para seccionar la región ósea mandibular. Se basa en segmentar la mandíbula a partir de sus ramas hacia los segundos molares de forma vertical. Por lo anterior, esta fractura es comúnmente empleada para corregir malformaciones como el prognatismo y retrognatismo mandibular al estar la mandíbula proyectada o impactada, respectivamente [155, 156]. La Figura 2.3 (c) muestra el patrón de fractura BSSO.
4. *Genioplastia*. Conocida también como mentoplastía, permite corregir malformaciones del mentón y las patologías relacionadas [157]. La Figura 2.3 (d) muestra el patrón de fractura de la genioplastia.

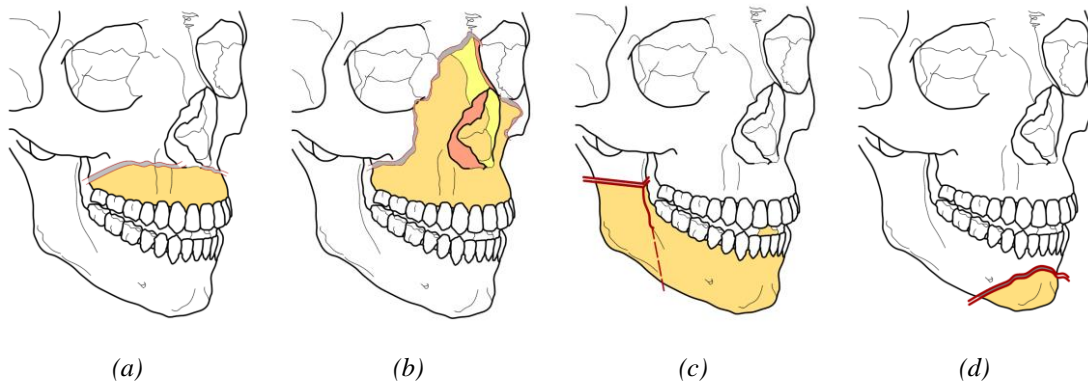


Figura 2.4 Patrones de fractura ósea involucrados en la cirugía ortognática: (a) LeFort I, (b) LeFort II, (c) osteotomía sagital de rama mandibular, BSSO, (d) genioplastía o mentoplastía.

## 2.2 Planeación tradicional de cirugía ortognática

El proceso tradicional de planeación de cirugía ortognática consta de cuatro etapas principales, como se muestra en la Figura 2.5 [3, 136, 147]:

1. Análisis clínico facial,
2. Análisis cefalométrico,
3. Cirugía de modelos y
4. Generación de la férula quirúrgica.

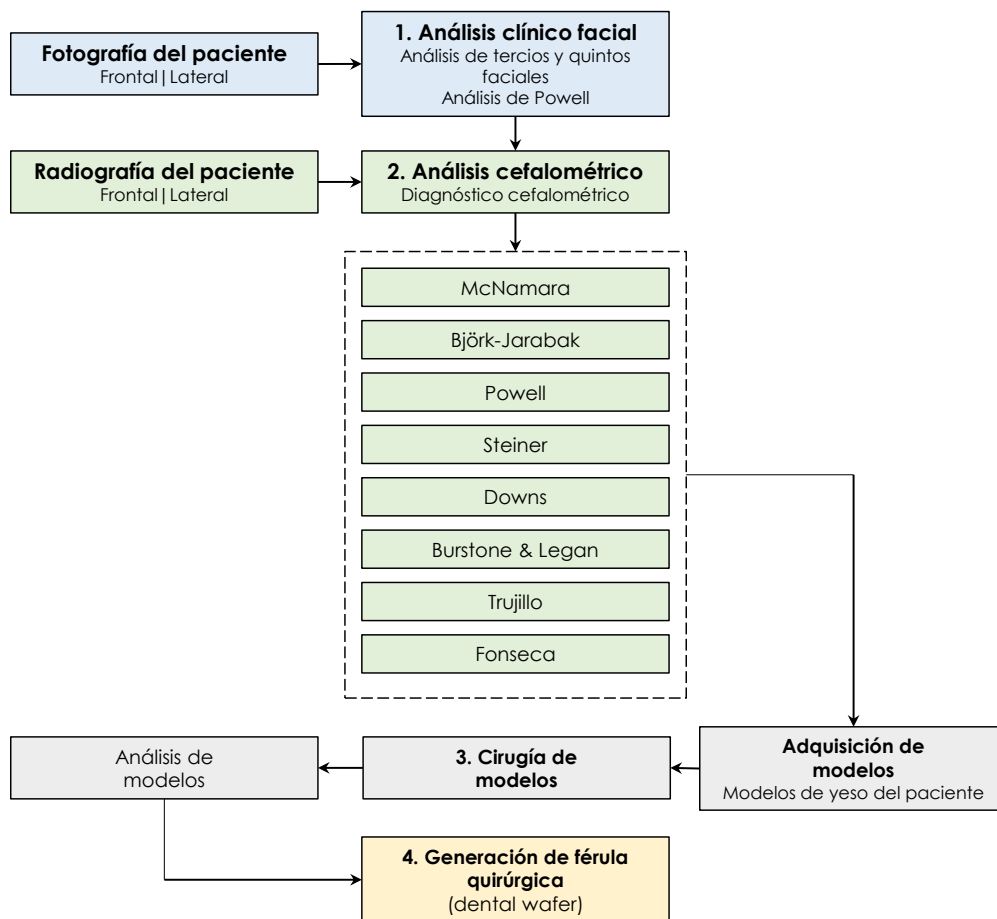


Figura 2.5 Proceso tradicional de planeación de la cirugía ortognática.

### 2.2.1 Análisis clínico facial

El análisis clínico facial consiste en el estudio de la morfología general y proporciones del perfil lateral y frontal del paciente [147]. Además, permite al médico obtener un prediagnóstico de la problemática maxilar del paciente y establecer la posibilidad de seguir un tratamiento quirúrgico o mecánico mediante ortodoncia. Este análisis realiza sobre fotografías del rostro previamente adquiridas e incluye las metodologías de tercios faciales, quintos faciales y análisis de Powell [3, 147, 158, 159].

En el análisis de tercios faciales, el perfil del rostro es dividido verticalmente de acuerdo con puntos anatómicos que deben corresponder a un tercio facial. Los puntos anatómicos corresponden al puente nasofrontal y nasolabial, como muestra la Figura 2.6(a). De acuerdo con la relación entre cada tercio facial el medico puede conocer la relación que existe entre el crecimiento que han tenido las estructuras óseas maxilares respecto a sus correspondientes faciales. Por lo tanto, en un perfil facial equilibrado se observa cada tercio del perfil facial igual uno con otro [147, 160].

El análisis de quintos faciales se realiza sobre la fotografía frontal del paciente, donde este es dividido en cinco secciones que deben equivaler a un ancho ocular. Este estudio es el equivalente del análisis de tercios faciales que se efectúa sobre el perfil facial. Sin embargo, los quintos faciales permiten al médico conocer asimetrías faciales debidas a un crecimiento excesivo o escaso de la masa ósea craneal [159]. La Figura 2.5(b) muestra las coincidencias anatómicas en el análisis de quintos faciales.

Una de las metodologías empleadas que ayudan al médico en la decisión de seguir un plan de tratamiento quirúrgico o mediante ortodoncia es el análisis de Powell. En este análisis se determina el ángulo nasofacial, nasomental, nasolabial y mentocervical a partir de la fotografía lateral del paciente, como se muestra en la Figura 2.5(c). El resultado obtenido es comparado con la norma propuesta por Powell quien efectuó diversos estudios para determinar los rangos angulares que satisfacen la armonía facial de un paciente sano [147, 159, 161]. La Figura 2.5(d) muestra los rangos angulares que debe satisfacer un perfil facial en equilibrio, así como el plan de tratamiento sugerido si las relaciones no satisfacen la norma de armonía facial.

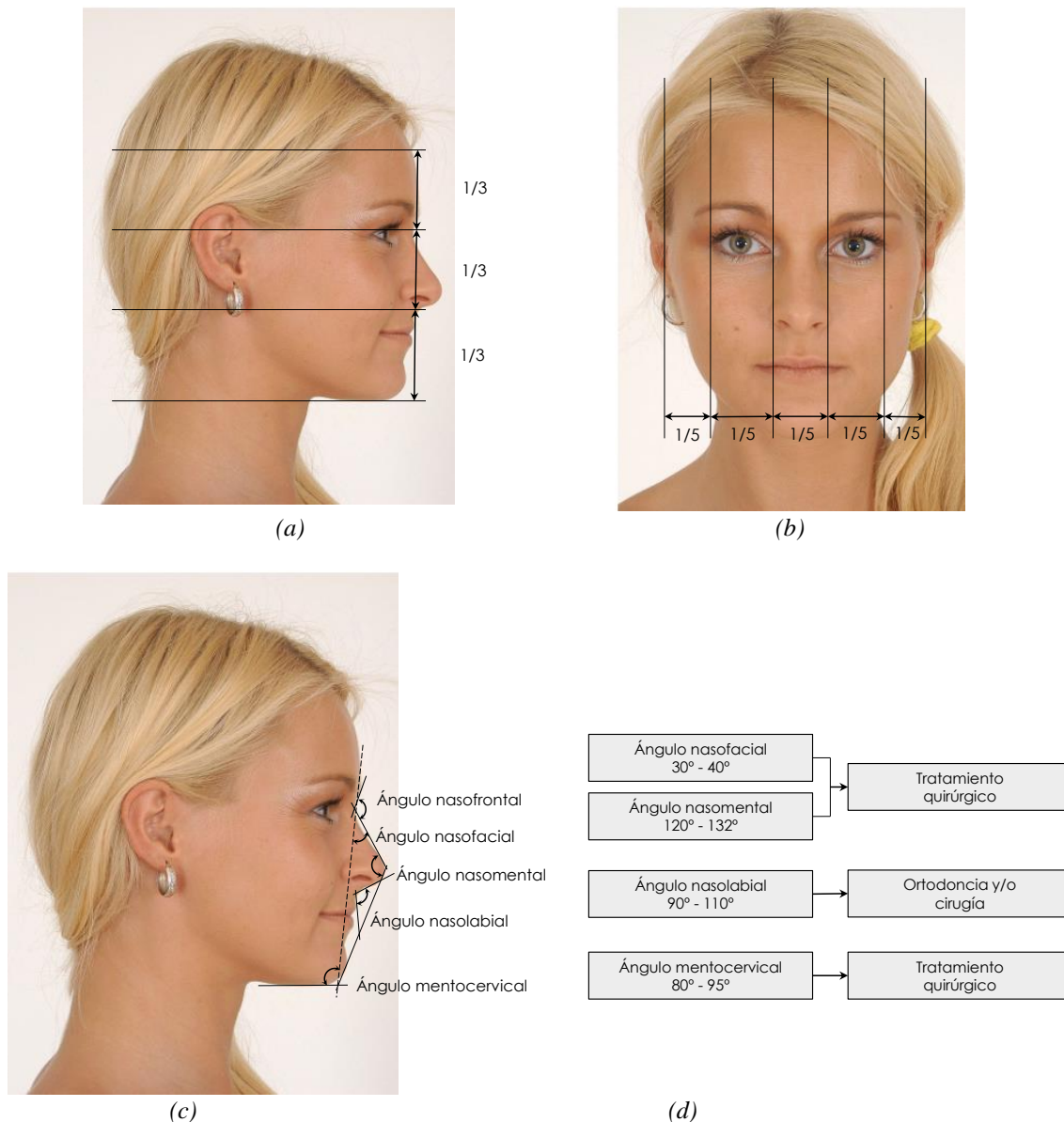


Figura 2.6 Metodologías de análisis clínicos faciales: (a) análisis de tercios faciales, (b) análisis de quintos faciales, (c) análisis de Powell, (d) normas angulares de armonía facial para el análisis de Powell y tipo de tratamiento recomendado.

### 2.2.2 Análisis cefalométrico

El análisis cefalométrico permite el estudio de las estructuras óseas craneocefálicas, dentarias, tejidos blandos y su interrelación [136, 162]. El análisis consiste en comparar las dimensiones óseas y de tejidos blandos del paciente con un grupo de referencias normales que corresponden a las esperadas de acuerdo a su grupo étnico o racial [147, 163]. Lo anterior permite al cirujano maxilofacial conocer cuantitativamente la complejidad del problema de desarmonía maxilar y determinar las acciones necesarias para corregirlo, y así satisfacer las normas dimensionales preestablecidas [34].

El estudio cefalométrico se realiza mediante la identificación de puntos anatómicos sobre radiografías del plano sagital o frontal del paciente. Con base a los puntos anatómicos identificados se obtienen relaciones angulares y dimensionales empleando instrumentos de medición convencionales como regla y transportador, Figura 2.7. A partir de las relaciones angulares y dimensionales, el médico obtiene una descripción del patrón craneofacial del paciente y genera un diagnóstico de la patología de desalineación maxilar [3]. De esta manera es posible seleccionar la modalidad del tratamiento de corrección maxilar y predecir su éxito [147].

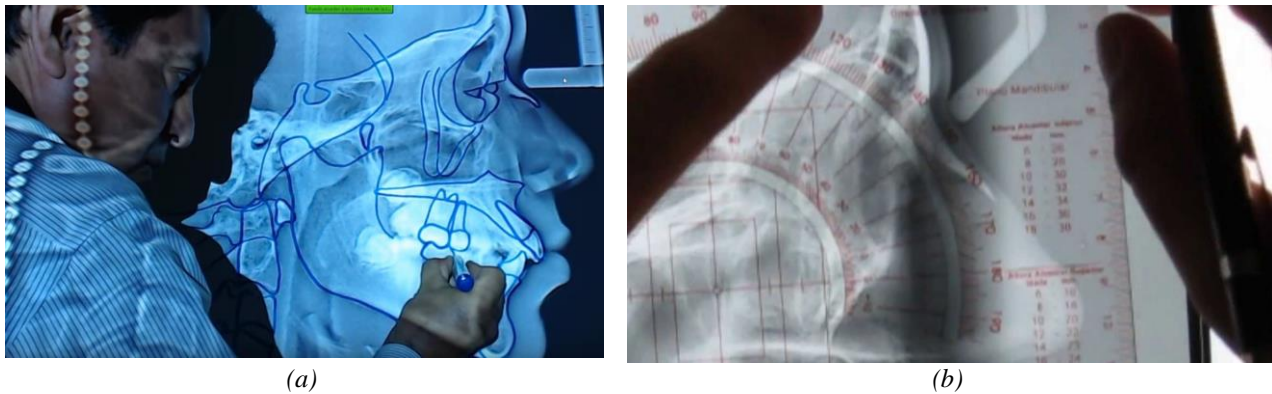


Figura 2.7 Análisis cefalométrico tradicional: (a) identificación de puntos anatómicos, (b) herramientas de medición empleadas en el análisis cefalométrico.

Dentro del estudio cefalométrico existe una variedad de metodologías que han sido desarrolladas. Estas metodologías se diferencian entre sí en la base y puntos anatómicos que emplean para el dimensionamiento de la estructura ósea y tejidos blandos. Lo anterior ha permitido que diversas técnicas cefalométricas sean empleadas particularmente para el diagnóstico y planificación de diversas patologías tratadas por ortodoncistas y cirujanos maxilofaciales [5, 147, 164, 165]; como las metodologías empleadas en la planeación de cirugía ortognática, Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Metodologías de análisis cefalométrico empleadas en cirugía ortognática.

Cefalometría	Características
McNamara	Profundiza el estudio de las relaciones entre los maxilares y las estructuras craneales. Relaciona los dientes con dientes, dientes con maxilares, los maxilares entre sí y maxilares con la base craneal. Este análisis es útil para el estudio esquelético de pacientes en crecimiento y en pacientes adultos en los que los problemas esqueléticos plantean la posibilidad de una solución quirúrgica.
Burstone & Legan	Permite el análisis del grosor de los tejidos blandos y determinar la forma facial y posición labial. Es útil para determinar los objetivos quirúrgicos.
Steiner	Estudio basado en el análisis esquelético, dental y estético que permite determinar la naturaleza, ubicación y extensión de las anomalías dentofaciales.
Jaraback	Se basa en trabajos de investigación publicados por Arnet Björk en 1969, por lo que también es conocida como cefalometría de Björk-Jarabak. Permite definir con precisión la región del complejo craneofacial donde se asienta la desarmonía maxilar que da origen a la anomalía. Esta metodología permite la predicción del crecimiento esquelético maxilar del tipo estructural y la posible rotación maxilar.
Powell	Analiza de una manera simple las principales masas estéticas de la cara utilizando ángulos interrelacionados entre sí. Consiste en el trazado de líneas y ángulos sobre tejidos blandos.
Downs	Análisis adecuado para señalar el tipo facial del paciente. El tipo facial determina si el rostro cubre o no el perfil armónico de acuerdo con la posición maxilar y la parte esquelético-dental.
Ricketts	El análisis de Ricketts es un análisis global en el que se emplean mediciones específicas para localizar el mentón en el espacio; localizar el maxilar a través de la convexidad de la cara; localizar la dentadura en la cara; y estudiar el perfil facial. En el análisis de Ricketts no se limita a analizar la situación actual del paciente, sino que permite predecir los efectos del crecimiento futuro y el tratamiento.
Frontal	Análisis empleado en el estudio de la simetría del complejo dentomaxilofacial y latero-desviaciones mandibulares. Permite determinar el grosor de las ramas ascendentes mandibulares y evaluar tratamientos de expansión o disyunción maxilar.
Trujillo	Permite efectuar un análisis dento-esquelético, de tejidos blandos y establecer los objetivos quirúrgicos.
Fonseca	Combina los criterios cefalométricos de Ricketts y McNamara además de incluir relaciones anatómicas de las vías aéreas del paciente. Se encuentra dirigida a tratar problemas maxilares de pacientes de origen latinoamericano.

A partir del análisis cefalométrico y habiendo obtenido un diagnóstico de la problemática facial del paciente, el médico decide el tipo de tratamiento a seguir y sus características dentro de las que se encuentran, el proceso de ortodoncia prequirúrgico, el tipo de fractura maxilofacial, el proceso de generación de fractura y la preparación preoperatoria de acuerdo con el historial clínico del paciente [166].

### 2.2.3 Cirugía de modelos

En la etapa de cirugía de modelos el cirujano emula la desalineación maxilar empleando modelos de yeso de las arcadas dentales del paciente. Los modelos de yeso permiten simular el tratamiento quirúrgico diseñado por el médico y determinar el grado de desplazamiento o rotación ósea requerido para corregir la desalineación maxilar. En la cirugía de modelos se identifican las siguientes etapas [3]:

1. *Adquisición y montaje articular.* En esta etapa los modelos de yeso empleados son adquiridos directamente del paciente y montados en un articulador que permite generar ex vivo la maloclusión dental. El proceso de adquisición de modelos se efectúa en el consultorio del médico cuidando la no alteración de las impresiones dentales del paciente durante su captura. La Figura 2.8 muestra los modelos de yeso y su montaje articular.

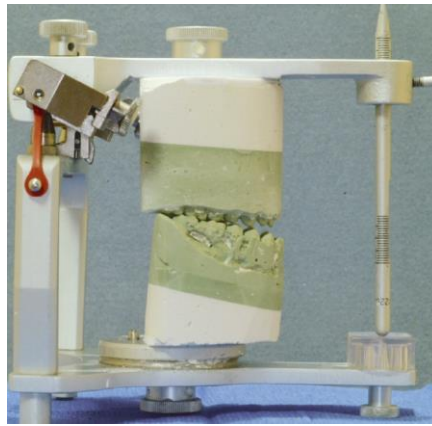
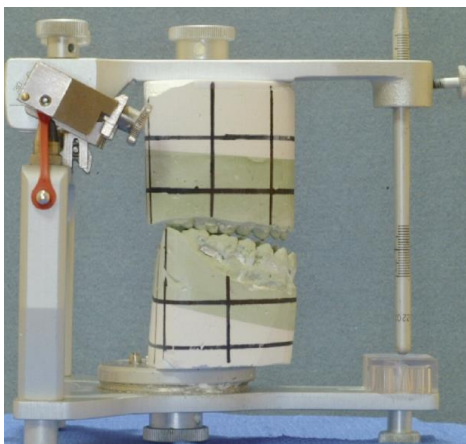


Figura 2.8 Modelos de yeso empleados en la planeación de cirugía ortognática montados en articulador.

2. *Seccionado.* A partir de los modelos de yeso montados en el articulador el médico traza manualmente un patrón de líneas de referencia que le permitirán posteriormente cuantificar el desplazamiento maxilar. Sobre una de las líneas de referencia el médico secciona manualmente los modelos de yeso empleando sierras dentadas simulando la fractura maxilar. La Figura 2.9 (a) muestra las líneas de referencia trazadas sobre los modelos y la Figura 2.9 (b) presenta el modelo de yeso seccionado.



(a)



(b)

Figura 2.9 Modelos de yeso seccionados. (a) líneas de referencia marcadas sobre modelos, (b) seccionado de modelos.



3. *Reposicionamiento.* Tomando en cuenta los resultados del análisis cefalométrico, el médico corrige la problemática de desalineación maxilar reposicionando los segmentos de yeso previamente obtenidos y fijándolos empleando cera. El reposicionamiento de los modelos se realiza repetidamente hasta obtener la oclusión idónea para el paciente en tratamiento. La Figura 2.10 muestra los modelos reposicionados sobre el articulador.



Figura 2.10 Modelos de yeso reposicionados.

4. *Cuantificación del desplazamiento.* Habiendo obtenido la oclusión idónea del paciente, el cirujano cuantifica manualmente el desplazamiento ejercido sobre cada modelo de yeso tomando como base las líneas de referencia trazadas con anterioridad. La cuantificación del desplazamiento se realiza sobre los seis grados de libertad empleando herramientas de medición como el vernier, goniómetro y regla. La Figura 2.11 muestra un ejemplo de cuantificación de desplazamiento.

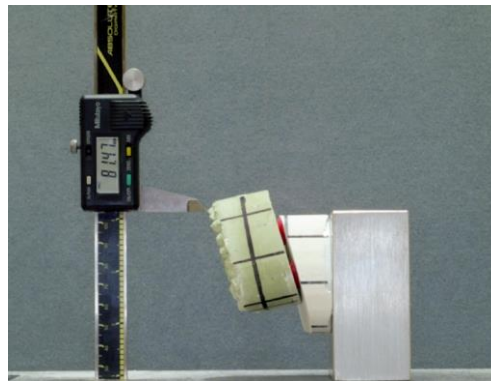


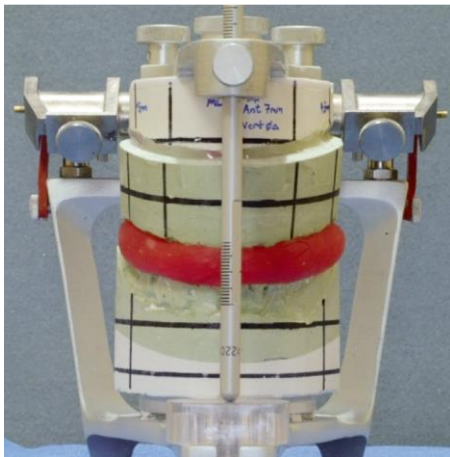
Figura 2.11 Cuantificación de desplazamiento en la cirugía de modelos.

A partir de la cirugía de modelos el médico determina clínicamente la factibilidad del desplazamiento maxilar requerido por el paciente tomando en cuenta el historial médico del paciente, antecedentes familiares, edad, y sexo [3]. Además, analiza el impacto en el resultado quirúrgico de los posibles errores propios del proceso tradicional de cirugía de modelos. De acuerdo con lo descrito en [167] el proceso tradicional de cirugía de modelos contienen errores en potencia que llevan a inexactitudes y dificultades durante la cirugía real. Entre los errores más trascendentales se encuentran el montaje inadecuado de los modelos, los errores de colocación de las líneas de referencia, y los errores asociados al proceso de medición de los segmentos desplazados. Por

lo tanto, el proceso de cirugía de modelos debe llevarse a cabo de forma cuidadosa con el fin de reducir los posibles errores inmersos en el proceso [167].

#### 2.2.4 Generación de férula quirúrgica

La generación de la férula quirúrgica se realiza una vez que se determina el desplazamiento maxilar requerido para la corrección de la desarmonía maxilar y se efectúa sobre los modelos de yeso reposicionados, Figura 2.12 (a). La férula quirúrgica se elabora de cera sobre los modelos de yeso e incluye grabada la nueva posición de la oclusión del paciente [3]. El modelo de cera permite la fabricación de la férula sobre un polímero, Figura 2.2 (b), y guía al cirujano en el reposicionamiento maxilar durante la cirugía para la oclusión final del paciente [3], Figura 2.12 (c).



(a)



(b)



(c)

*Figura 2.12 Generación de férula quirúrgica: (a) generación de férula quirúrgica de cera sobre los modelos de yeso reposicionados, (b) férula quirúrgica de acrílico, (c) férula quirúrgica empleándose durante la reposición maxilar.*

Aunque el proceso de planeación tradicional es efectivo requiere una alta precisión e inversión de tiempo, y los resultados dependen del registro preciso de la oclusión dental y el montaje de los modelos en el articulador [3, 6, 7, 152].

### 2.3 Herramientas virtuales para la planeación quirúrgica ortognática.

Desde la aparición de las tecnologías computacionales y de realidad virtual (VR), varios trabajos de investigación se han centrado en el desarrollo aplicaciones orientadas a la medicina. Estos sistemas se han orientado a asistir a especialistas en tareas médicas como el diagnóstico, la planificación y la simulación de diferentes procedimientos quirúrgicos en un entorno virtual [14, 15]. Además, el sentido del tacto también se ha integrado en muchos de estos sistemas mediante el uso de tecnologías hápticas [16-19]. Las tecnologías hápticas permiten la interacción táctil con el modelo virtual del paciente y los instrumentos quirúrgicos [8, 20-22]. Por lo tanto, los sistemas informáticos basados en la realidad virtual orientados en aplicaciones médicas ofrecen a los profesionales de la medicina la experiencia de poner en práctica su conocimiento médico y habilidades quirúrgicas de forma virtual, al igual de permitir la capacitación de estudiantes de medicina y practicantes novatos.

En el área de la cirugía ortognática, el proceso de planificación tradicional comenzó a evolucionar con el uso de métodos informáticos para realizar análisis cefalométricos [168], Figura 2.13. En estos sistemas, los análisis cefalométricos se pueden realizar de forma rápida ya que no es necesario que el médico efectúe el proceso de dimensionamiento manual como ocurre en el proceso de cefalometría tradicional.



Figura 2.13 Sistema de cefalometría asistida por computadora.

Dentro de los sistemas informáticos de cefalometría, reportados en la literatura se encuentra el que se describe en [169] donde se propone la identificación automática puntos cefalométricos sobre radiografía previamente digitalizada. En [170] se reporta un sistema de cefalometría 3D el cual no requiere la digitalización del paciente, ya que emplea un digitalizador táctil 3D Microscribe para identificar los puntos anatómicos sobre el rostro del paciente in vivo. Otros trabajos reportan la generación de cefalometría 2.5D a partir de la identificación háptica de puntos cefalométricos sobre el modelo 3D del cráneo del paciente, los puntos cefalométricos son proyectados al plano sagital del rostro y las relaciones óseas se obtienen empleando las metodologías convencionales de cefalometría 2D [22]. Además, se han propuesto sistemas que se basan en el proceso tradicional de cefalometría y solamente efectúan el cálculo de las relaciones óseas de forma automática, tras la identificación de puntos anatómicos por parte del especialista [171].

También se han propuesto sistemas de cefalometría asistida por computadora que se encuentran disponibles de forma comercial, entre los que se encuentran: Nemoceph [172], Dolphin [173], Ceph-X [174], OrisCeph Rx [175], Audax [176], dHAL Viewbox 4 [177] y PlanMeca Romexis con la capacidad de emplearse en dispositivos portátiles como tabletas digitales [178]. La siguiente evolución del proceso de planeación de OGS involucró el escaneo 3D y las tecnologías de ingeniería. Esta evolución permitió la reconstrucción y visualización tridimensional del cráneo del paciente, la segmentación del modelo virtual del paciente, el

desplazamiento y la reubicación de fragmentos óseos. Además hizo posible el diseño de guías quirúrgicas dentro del entorno virtual y su fabricación con la finalidad de ayudar al cirujano en el procedimiento real [26-29, 91, 179]. Estos sistemas modernos de planeación para la cirugía ortognática integran herramientas de ingeniería tales como el diseño asistido por computadora y la manufactura asistida por computadora (CAD/CAM) para efectuar la cirugía de modelos y la generación de la férula quirúrgica. Además, permiten la inclusión de técnicas de fabricación avanzadas como la manufactura aditiva y la integración del sentido del tacto mediante el uso de la tecnología háptica. Los sistemas hápticos han proporcionado a los sistemas de planeación de cirugía ortognática la capacidad de retroalimentación de fuerza en un entorno virtual para generar el corte y el reposicionamiento maxilar. Conjuntamente, brindan a los usuarios la facultad de explorar características anatómicas y reducir la curva de aprendizaje para los cirujanos novatos [16, 21, 22, 30, 180].

Además, dentro de la evolución de las herramientas tecnológicas en el tratamiento y planeación de la cirugía ortognática se han incluido tecnologías como la realidad aumentada en conjunto con los HMD para la sobreposición de trazos generados de forma previa sobre el cráneo del paciente que guían al cirujano durante la operación de corte y reposicionamiento maxilar, dentro de los sistemas de AR se encuentran los propuestos en [31, 181, 182]. Otros sistemas proponen el uso de la realidad mixta (Mixed reality, MR) que mediante la combinación de la realidad aumentada y la realidad virtual asisten al cirujano en el proceso de planeación y cirugía real de la OGS [183, 184]. Entre las investigaciones reportadas que emplean MR enfocadas al tratamiento y planeación de OGS se encuentran la propuesta en [185] donde se presenta un sistema que mediante el seguimiento del movimiento 3D de los modelos dentales en el espacio real, se reposicionan los modelos maxilares en el ambiente virtual. En [186] se propone una metodología que permite a un brazo robótico asistir al cirujano en el reposicionamiento de segmentos maxilares a partir de los datos obtenidos de la planeación quirúrgica. Los trabajos de investigación reportados en [187, 188] proponen el uso de un brazo robótico para cuantificar y controlar el desplazamiento maxilar durante la cirugía.

De acuerdo con lo reportado por diversos trabajos de investigación, la implementación de los sistemas de planeación quirúrgica ortognática asistida por computadora ha permitido lograr mejoras significativas en el proceso de planificación de OGS [7, 33-35, 189]. Estas mejoras se identifican en la reducción de tiempos de ejecución de algunas etapas del proceso de planeación, como lo es el proceso de análisis cefalométrico y la visualización tridimensional de la anatomía del paciente. En la Tabla 2.2 se presenta un resumen de las principales características de algunos sistemas existentes reportados en la literatura y comercialmente disponibles para la planificación de cirugía ortognática asistida por computadora. El resumen discrimina cada sistema tomando en cuenta la capacidad para efectuar cada una de las etapas del proceso de planeación de OGS y generar la información quirúrgica relevante. Además se identifica si se cuenta con la capacidad de retroalimentar de forma háptica al usuario.

Tabla 2.2 Características principales de sistemas para la planeación de cirugía ortognática asistida por computadora.

Sistema	E	AF	AC	CM	GF	EIQ	HD	Características principales
Maxilim® (Medicim NV, Mechelen, Belgium) [112]	C	-	-	x	x	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización del modelo 3D del paciente.</li> <li>- Segmentado virtual y reposicionamiento del modelo.</li> <li>- Generación de férula quirúrgica empleando herramientas CAD.</li> <li>- Generación de reporte de reposicionamiento maxilar.</li> </ul>
ProPlan CMF® (Materialise, Leuven, Belgium) [190]	C	-	x	x	x	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización 2D/3D del modelo del paciente.</li> <li>- Análisis cefalométrico 3D en base a la proyección 2D de puntos anatómicos.</li> <li>- Generación virtual de férula quirúrgica.</li> </ul>
Dolphin Imaging® [127]	C	-	x	-	-	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lector de archivos en formato DICOM, jpg, png y tiff.</li> <li>- Análisis cefalométrico 2D.</li> <li>- Superposición del trazo cefalométrico sobre fotografía del paciente.</li> <li>- Simulación 2D del tratamiento quirúrgico.</li> <li>- Generación de reporte de resultados cefalométricos.</li> </ul>
NemoFab® (NemoTec, Madrid, Spain) [191]	C	-	x	x	x	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización de la anatomía del paciente en 2D y 3D.</li> <li>- Análisis cefalométrico 2D y 3D proyectado.</li> <li>- Generación de férula quirúrgica empleando herramientas CAD.</li> </ul>
Keeve et al. (1996) [192]	R	-	-	x	-	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrucción ósea 3D del paciente a partir de imágenes en formato DICOM.</li> <li>- Reconstrucción de tejidos blandos a partir de fotografías del paciente.</li> <li>- Segmentación virtual del modelo del paciente a partir de planos de corte.</li> </ul>
Bettega et al. (2000) [32]	R	-	x	x	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Análisis cefalométrico 3D a partir de la proyección 2D de puntos anatómicos.</li> <li>- Cirugía de modelos generada por superposición 3D de modelos de yeso escaneados.</li> </ul>
Chapuis et al. (2005) [26]	R	-	-	x	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrucción 3D del modelo del paciente a partir de imágenes DICOM.</li> <li>- Cirugía de modelos empleando modelos de yeso escaneados tridimensionalmente.</li> </ul>
Noguchi et al. (2007) [193]	R	-	x	x	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lector de radiografía del paciente en formatos jpg.</li> <li>- Reconstrucción de tejidos blandos a partir del escaneo 3D de modelos de yeso y rostro del paciente.</li> <li>- Análisis cefalométrico 3D a partir de la proyección 2D de puntos anatómicos.</li> <li>- Permite el reposicionamiento de los modelos virtuales de yeso.</li> </ul>
CASSOS/Jones et al. (2007) [194]	R	-	x	2D	-	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lector de radiografías 2D.</li> <li>- Análisis de tejidos blandos empleando del perfil del paciente.</li> <li>- Reposicionamiento maxilar 2D.</li> </ul>

E: estatus del sistema; C: sistema comercial; R: sistema reportado en la literatura; AF: análisis facial; AC: análisis cefalométrico; CM: cirugía de modelos; GF: generación de férula quirúrgica; EIQ: generación y extracción de información quirúrgica; HD: dispositivo háptico; x: función disponible; -: función no disponible.

Tabla 2.2 Características principales de sistemas para la planeación de cirugía ortognática asistida por computadora, (continuación).

Sistema	E	AF	AC	CM	GF	EIQ	HD	Características principales
Olszewski et al. (2008) [184]	R	-	x	x	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrucción 3D del paciente a partir de la información de la CT.</li> <li>- Cefalometría 3D basada en la proyección 2D.</li> <li>- Segmentado del modelo guiado por algoritmo de visión.</li> <li>- Permite el reposicionamiento de modelos virtuales.</li> </ul>
Nadjmi et al. (2010) [35]	R	-	-	x	-	-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cirugía de modelos virtual empleando modelos de yeso escaneados.</li> <li>- Reposicionamiento de modelos de yeso escaneados en 3D.</li> </ul>
Olsson et al. (2013) [21]	R	-	-	x	-	-	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reconstrucción 3D del modelo del paciente.</li> <li>- Detección de colisiones entre modelos virtuales.</li> <li>- Renderizado gráfico estereoscópico.</li> <li>- Retroalimentación háptica</li> </ul>
VR-MFS/Wu et al. (2013) [195]	R	-	-	x	-	-	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización 3D de tejidos blandos y esqueléticos.</li> <li>- Segmentado libre del modelo 3D a partir de patrón de corte definido por el usuario.</li> <li>- Permite la interacción háptica del usuario con los modelos virtuales.</li> </ul>
Medellin et al. (2016) [22]	R	-	x	-	-	x	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización de la anatomía del paciente 2D y 3D.</li> <li>- Cefalometría 3D a partir de la proyección de puntos anatómicos sobre plano.</li> <li>- Cefalometría asistida hápticamente.</li> <li>- Generación automática de resultados cefalométricos.</li> </ul>
VSP Orthognathics (3D Systems) [196]	C	-	-	x	x	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización de la anatomía 3D del paciente.</li> <li>- Reposicionamiento y segmentado maxilar a partir de un corte definido.</li> <li>- Simulación del resultado postquirúrgico de los tejidos blandos.</li> <li>- Diseño de la férula quirúrgica.</li> </ul>
Žuk et al. (2018) [197]	R	-	-	x	-	x	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reposicionamiento háptico de segmentos virtuales introducidos de forma independiente.</li> <li>- Extrae la información de posición final.</li> </ul>
Arikatla et al. (2018) [198]	R	-	-	x	-	x	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite la simulación del taladrado y corte del modelo 3D del paciente.</li> <li>- Retroalimentación háptica del taladrado y corte del modelo 3D.</li> <li>- Reposicionamiento háptico de los segmentos virtuales.</li> </ul>
McAllister et al. (2018) [199]	R	-	-	-	-	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Generación de plantillas para guiar la generación de fracturas ortognáticas de forma virtual a partir del modelo 3D del paciente.</li> </ul>
AnatomicAligner/ Yuan et al. (2017) [200]	R	-	3D	x	x	x	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Permite la reconstrucción 3D de la anatomía del paciente.</li> <li>- Incluye algoritmos de cefalometría 3D.</li> <li>- Segmentado de la anatomía del paciente por cortes precargados.</li> <li>- Generación de la plantilla quirúrgica a partir de la copia del contorno del modelo dental reposicionado.</li> </ul>

E: estatus del sistema; C: sistema comercial; R: sistema reportado en la literatura; AF: análisis facial; AC: análisis cefalométrico; CM: cirugía de modelos; GF: generación de férula quirúrgica; EIQ: generación y extracción de información quirúrgica; HD: dispositivo háptico; x: función disponible; -: función no disponible.

Tabla 2.2 Características principales de sistemas para la planeación de cirugía ortognática asistida por computadora, (continuación).

Sistema	E	AF	AC	CM	GF	EIQ	HD	Características principales
Lee et al. (2016) [201]	R	-	-	x	-	x	-	- Genera el segmentado maxilar en la etapa de reconstrucción del modelo 3D. - Reposicionamiento maxilar a partir de puntos anatómicos indicados por el especialista cuantificando el desplazamiento efectuado.
Shirota (2016) [202]	R	-	-	x	-	x	-	- Genera el segmentado del modelo 3D del paciente por cortes precargados. - Cuantifica el desplazamiento maxilar por medio de marcar indicadas por el usuario.
Keyhole/Lee et al. (2015) [203]	R	-	-	-	x	x	-	- Orientado a la generación de plantillas quirúrgicas a partir del reposicionamiento maxilar efectuado en un software externo. - Emplea herramientas CAD/CAM para la generación de la férula quirúrgica. - Permite definir en la plantilla quirúrgica la ubicación de las sujeciones maxilares.
Lutz et al. (2019) [204]								- Efectúa el segmentado maxilar mediante la división del mallado del modelo 3D. - Permite determinar el resultado postquirúrgico de los tejidos blandos empleando un modelo masa-resorte-amortiguador

E: estatus del sistema; C: sistema comercial; R: sistema reportado en la literatura; AF: análisis facial; AC: análisis cefalométrico; CM: cirugía de modelos; GF: generación de férula quirúrgica; EIQ: generación y extracción de información quirúrgica; HD: dispositivo háptico; x: función disponible; -: función no disponible.

## 2.4 Discusión

A partir de las características de los sistemas para la planeación de cirugía ortognática asistida por computadora presentados en la Tabla 2.2, se identifican las siguientes particularidades:

1. Múltiples sistemas integran herramientas para la reconstrucción 3D y la visualización de la anatomía virtual del paciente la cual es generada a partir de escáneres médicos como la tomografía computarizada y resonancia magnética.
2. Solo algunos trabajos incorporan en un mismo sistema todas las etapas que se toman en cuenta en el proceso tradicional de planeación de la cirugía ortognática.
3. Diversos trabajos orientados a la planeación de OGS se enfocan a únicamente efectuar el reposicionamiento maxilar y algunos integran la generación de la plantilla quirúrgica, dejando de lado etapas previas del proceso tradicional de planeación ortognática.
4. Se observan trabajos que brindan la capacidad de efectuar análisis cefalométrico 2D y 3D de forma exitosa, sin embargo, algunos de estos no incluyen herramientas que permitan efectuar etapas posteriores del proceso de planeación de OGS.
5. Solo algunos sistemas integran el comportamiento físico de los objetos en el entorno virtual.
6. Las funcionalidades mínimas necesarias para la planeación asistida por computadora de la cirugía ortognática son la capacidad de ejecutar análisis cefalométricos, la segmentación de modelos y el reposicionamiento de fragmentos óseos virtuales [32]. Estas funcionalidades se han integrado en algunos sistemas de asistencia para la planeación de OGS. Sin embargo, los sistemas desarrollados no proporcionan una solución integral ya que se han centrado en el desarrollo de herramientas que asisten al cirujano en etapas específicas del proceso de planificación.

7. Solo algunos sistemas incluyen funcionalidades para la simulación de la cirugía de modelos mediante la manipulación del modelo tridimensional del paciente como lo son el seccionado virtual y reposicionamiento. Dentro de los sistemas que integran herramientas para llevar a cabo la cirugía de modelos, estos se auxilian de la digitalización tridimensional de los modelos de yeso del paciente, los cuales son reposicionados en un espacio virtual simulando el montaje sobre el articulador, como ocurre en el proceso de planeación tradicional.
8. La generación virtual de la férula quirúrgica es lleva a cabo empleando herramientas CAD de ingeniería. Esta funcionalidad se incluye solo en algunos sistemas.
9. La transferencia de información quirúrgica no es continua a lo largo del proceso de planificación, y el quirófano. Lo anterior debido a que los sistemas desarrollados solo se enfocan en etapas específicas del proceso de planeación lo cual sigue siendo una limitación importante en los sistemas de planeación asistida por computadora de OGS actuales.

En general los sistemas reportados en la literatura pretenden auxiliar al médico en diversas etapas del proceso de planeación quirúrgica de OGS. Sin embargo, se observa que la mayoría de los sistemas se enfocan solo en etapas específicas del proceso de planeación. Además, dejan a un lado la generación de información útil para la práctica quirúrgica real.

A pesar de que diversas tecnologías como la realidad aumentada y los sistemas hápticos han sido integradas en el proceso de planeación de OGS y transferencia del plan quirúrgico al paciente se observa una brecha para que los sistemas desarrollados incluyan todas las etapas del proceso de planeación en un mismo sistema [205]. Además no ofrecen una mejora significativa en el proceso de planeación de OGS, ya que el cirujano aún debe efectuar diversas etapas del proceso de planeación quirúrgica de forma manual, lo cual genera que el resultado de planeación quirúrgica dependa de las habilidades manuales del médico.

Por lo cual existe la necesidad del desarrollo de un sistema que asista al cirujano en el proceso de planeación quirúrgica de OGS y permita mejorar el desempeño en términos de tiempo del proceso de planeación y diagnóstico. Lo anterior mediante el desarrollo e implementación de herramientas que permitan al médico seccionar y manipular de forma controlada los objetos, así como percibir su comportamiento físico y su interacción en un escenario virtual. Lo anterior con la finalidad de reducir la dependencia de las habilidades manuales del cirujano en el proceso de planeación de OGS.



## Capítulo 3. Desarrollo del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas

En este capítulo se describe el funcionamiento y principales características de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 (*Ortognathic Surgery System v2.0*), la cual ha sido desarrollada para realizar de manera integral el proceso de planeación de la cirugía ortognática.

### 3.1 Descripción del sistema

El sistema OSSys v2.0 fue concebido siguiendo los criterios de calidad de software que establece la norma ISO-9126 [206]. De acuerdo con ISO-9126 los atributos que debe satisfacer un producto de software refieren a lo siguiente [207, 208]:

- *Funcionalidad*: la capacidad del software para proveer al usuario las funciones y necesidades para las cuales se desarrolla.
- *Fiabilidad*: la capacidad del software de mantener un nivel de rendimiento bajo determinadas condiciones de uso.
- *Usabilidad*: la capacidad del producto de software de ser entendido, aprendido y usado.
- *Mantenibilidad*: la capacidad del producto de software de ser modificado. Dichas correcciones deben incluir, mejoras o adaptaciones a cambios en el entorno y especificaciones funcionales.
- *Portabilidad*: capacidad del software de ser trasladado de un entorno informático a otro.

A partir de los atributos que considera ISO-9126, se diseñó el sistema OSSys siguiendo una arquitectura modular o de subsistemas de acuerdo con la ingeniería de software. La arquitectura modular de un producto de software brinda las ventajas de tener una independencia funcional y una amplia adaptabilidad a actualizaciones y a la corrección de errores. Igualmente, permite el acoplamiento de nuevas herramientas o módulos que permiten incrementar sus atributos de funcionalidad permitiendo el refinamiento de cada subsistema [207].

La arquitectura modular, ha permitido a OSSys v2.0 incorporar los atributos descritos por ISO-9126 a su diseño. Definiendo la funcionalidad de la plataforma OSSys v2.0 como un sistema para proveer al especialista médico la capacidad de efectuar todas las etapas del proceso de planeación de la cirugía ortognática (OGS) incorporando los sistemas hápticos y la realidad virtual.

Para satisfacer el criterio de funcionalidad que establece ISO-9126 y para el cual OSSys v2.0 ha sido concebido, se efectuó el proceso de investigación de las tareas involucradas en cada una de las etapas del proceso de planeación de OGS, en conjunto con una revisión bibliográfica de los sistemas informáticos que han sido propuestos para la planeación de OGS (capítulo 2), identificando los requerimientos del sistema OSSys2.0 los cuales son:

1. Capacidad de integrar todas las etapas del proceso de planeación de OGS.
2. Capacidad de seccionar y manipular la anatomía del paciente.
3. Capacidad de efectuar el diagnóstico asistido por computadora.
4. Capacidad de prevenir la sobreposición de segmentos virtuales.
5. Capacidad de extraer y generar información quirúrgica relevante de cada etapa del proceso de planeación quirúrgica.
6. Capacidad de generar de forma asistida la generación de la férula quirúrgica.

La arquitectura modular brinda al sistema OSSys atributos de fiabilidad y mantenibilidad. La modularidad permite que OSSys solamente ejecute las tareas activas en los módulos activos con la finalidad de ser fiable en diferentes entornos informáticos, teniendo una independencia funcional de cada módulo. Además, la arquitectura modular brinda a OSSys la capacidad de incorporar nuevos módulos, corregir errores en módulos específicos e incrementar sus funciones, de acuerdo con los avances informáticos y médicos en el proceso de planeación de OGS, haciendo a OSSys adaptable a nuevos cambios.

La modularidad empleada en la plataforma OSSys v2.0 propuesta, se identifica por la descomposición orientada a objetos. En la descomposición orientada a objetos, el producto de software se descompone en subsistemas que comunican entre sí. Este criterio es el más usado hoy día, y consiste en dividir la funcionalidad principal, en módulos (objetos) que encapsulan todas sus operaciones. Cada módulo realiza una tarea independiente y específica, encaminada a satisfacer la función principal del sistema diseñado. Por lo cual es sencillo modificar los módulos de forma independiente sin afectar otros [209, 210].

La arquitectura modular del sistema propuesto se muestra en la Figura 3.1 y consta de cuatro módulos principales que interactúan entre sí, los cuales se basan en el proceso de planeación quirúrgica tradicional. Los principales módulos de la plataforma OSSys v2.0 se describen a continuación, y corresponden a las cuatro etapas del proceso de planeación de OGS:

1. *Módulo de análisis facial.* Comprende herramientas para permitir realizar el análisis facial a partir de imágenes del paciente, las cuales pueden ser importadas en formato de imagen común como \*.jpg, \*.tiff y \*.png. El módulo facial incorpora la capacidad de proporcionar a los cirujanos un diagnóstico preliminar de la patología anatómica facial del paciente.
2. *Módulo de análisis cefalométrico.* Permite realizar el análisis y diagnóstico cefalométrico asistido por computadora a partir de la radiografía lateral de cráneo del paciente la cual es importada en formato de imagen \*.jpg, \*.tiff y \*.png. En este módulo se han implementado diversas metodologías cefalométricas reportadas en la literatura y comúnmente utilizadas en la práctica quirúrgica.
3. *Módulo de cirugía de modelos.* Integra herramientas de asistencia para llevar a cabo la cirugía de modelos de manera digital a partir del modelo tridimensional digital del paciente, el cual puede ser importado al sistema en cualquiera de los formatos \*.obj, o \*.stl. Además, en este módulo se incorporan herramientas de modelado para permitir el seccionado y reposicionamiento del modelo virtual del paciente. También se incorpora la interacción háptica para proveer al usuario la sensación táctil durante la manipulación de los objetos virtuales.
4. *Módulo de generación de férula quirúrgica.* Incorpora funciones de diseño asistido por computadora (CAD) para generar de manera semiautomática la férula quirúrgica, producto de la planeación quirúrgica, necesaria para guiar la posición del maxilar durante el procedimiento quirúrgico real.

Estos cuatro módulos principales interactúan entre sí por medio de los siguientes módulos integradores:

- *Módulo gráfico.* Responsable de crear la escena virtual y renderizar el modelo virtual del paciente.
- *Módulos de entrada/salida de datos.* Responsable de recopilar, calcular y registrar todos los datos de planificación preoperatorios, incluida la información necesaria en el quirófano y el modelo resultante de la férula quirúrgica.
- *Módulo físico-háptico.* Responsable de la retroalimentación dinámica de la manipulación de los objetos virtuales mediante el uso de la interfaz háptica. Este módulo también permite la manipulación libre y la detección de colisiones de objetos virtuales y fragmentos de hueso utilizando seis grados de libertad (Degree of freedom, DoF).

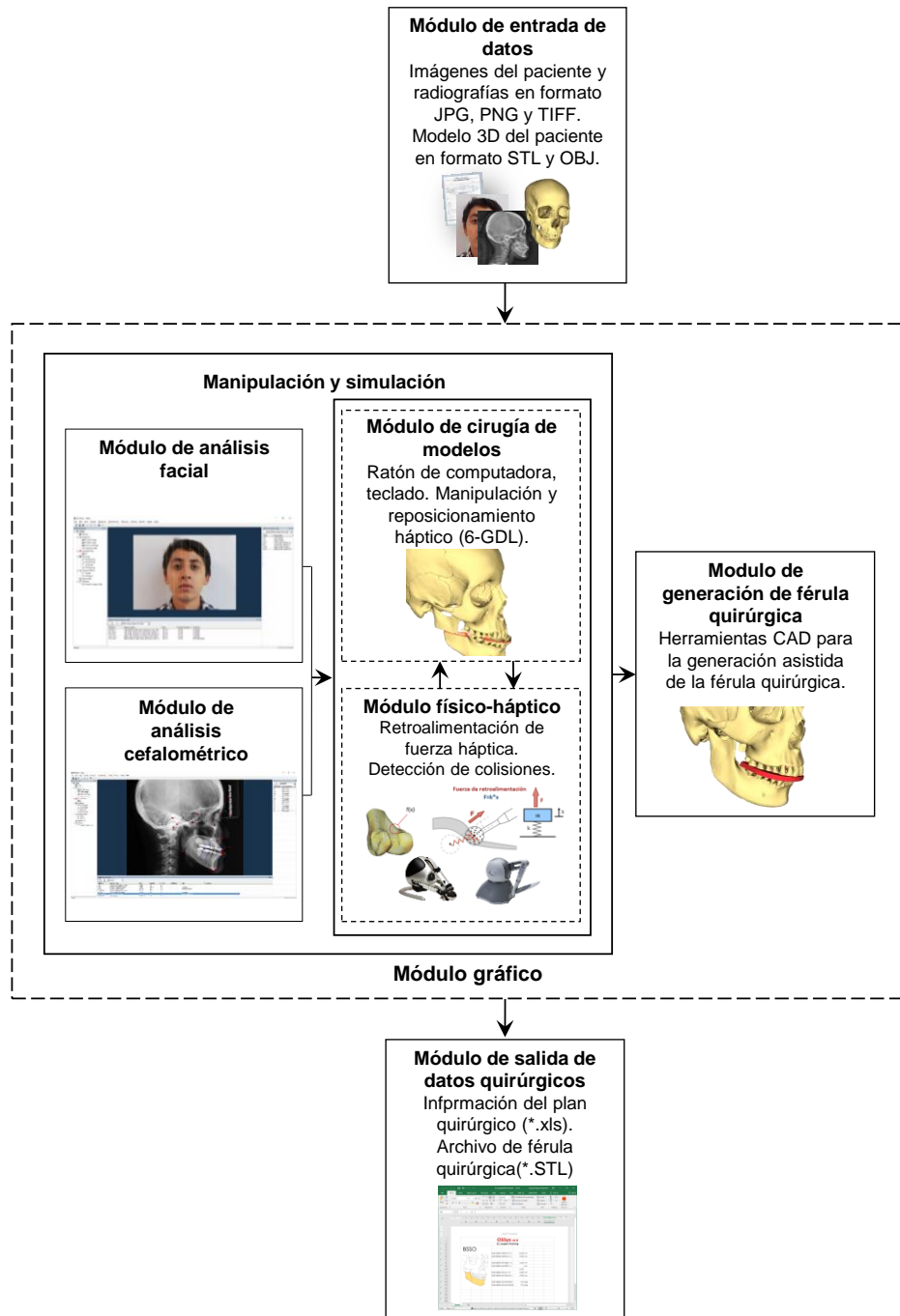


Figura 3.1 Arquitectura de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

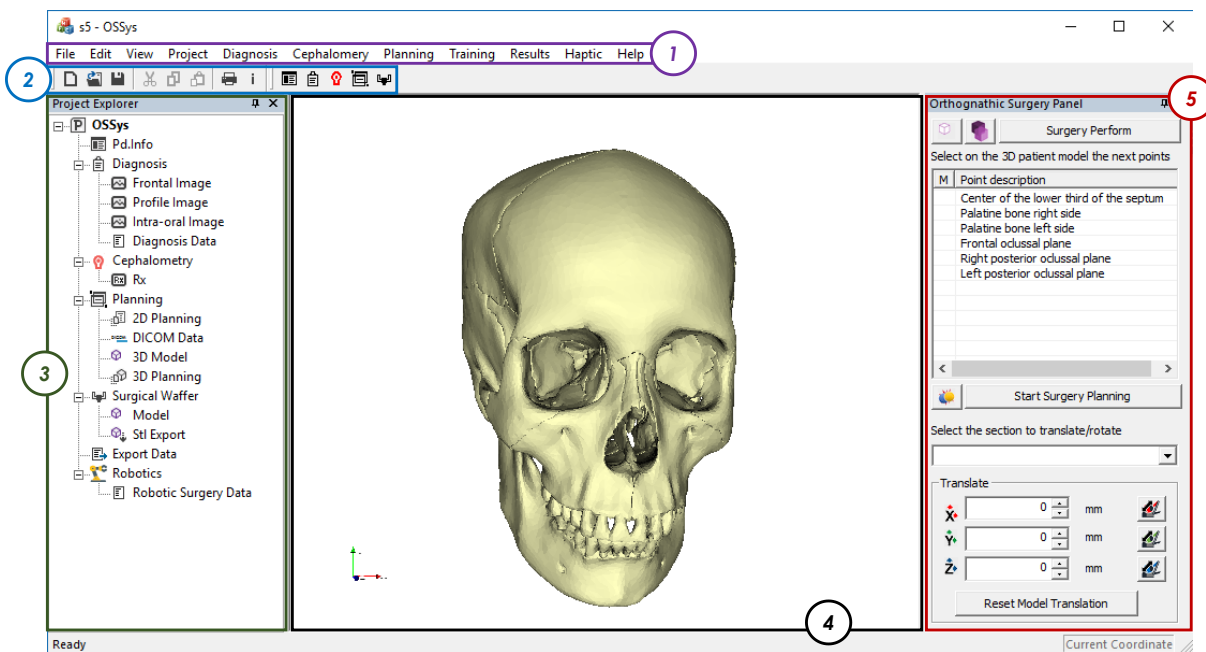
La modularidad orientada a objetos del sistema propuesto se logró empleando el lenguaje de programación C++ en conjunto con Microsoft Foundation Classes (MFC) de MS-Visual Studio 2012. La librería de clases MFC permitió crear la interfaz gráfica de usuario (Graphic user interface, GUI) en un ambiente de Windows. En conjunto con MFC, se integró la librería gráfica de clases VTK 5.10.1 de Kitware © [211] con la finalidad

de generar el módulo gráfico, y la librería háptica H3D-API® 2.2.0 [212] y la librería de simulación física Bullet Physics 2.85® [213] para generar el módulo físico-háptico. Cada una de las librerías integradas en OSSys v2.0 contienen los objetos (clases) que permitieron constituir cada uno de los módulos principales de la plataforma propuesta.

El sistema OSSys se desarrolló sobre un sistema informático que emplea el sistema operativo Microsoft® Windows® 10 sobre un equipo de cómputo con procesador Intel® Core i5@3.10GHz, 8GB de memoria RAM y un procesador gráfico NVIDIA® GForce-GT 635 con 1024MB de memoria de video dedicada a gráficos. Además, se empleó un dispositivo háptico de la marca Sensable® modelo Phantom Omni® para retroalimentar al usuario la fuerza resultante de la manipulación de los objetos virtuales.

### 3.2 Interfaz gráfica

La interfaz gráfica de usuario del sistema permite al usuario acceder a las herramientas implementadas en cada módulo. La interfaz gráfica se encuentra diseñada siguiendo la secuencia del proceso de planeación tradicional, por lo que el acceso a cada uno de los módulos es posible desde diversos apartados como el menú principal del sistema, el panel de exploración de proyecto y la barra de herramientas de planeación quirúrgica. La Figura 3.2 presenta la interfaz gráfica de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 y sus principales elementos.



- 1 Menú principal.
- 2 Barra de herramientas de planeación quirúrgica.
- 3 Explorador de proyecto.
- 4 Entorno virtual.
- 5 Ventana de herramientas del módulo seleccionado.

Figura 3.2 Interfaz gráfica de la plataforma OSSys v2.0.

Los principales elementos de la interfaz gráfica se describen a continuación:

**Menú principal.** Contiene el acceso a las funcionalidades del sistema, así como el acceso a los diferentes módulos de planeación. La Figura 3.3 muestra el menú principal junto con sus submenús asociados a cada opción, los cuales se describen a continuación:

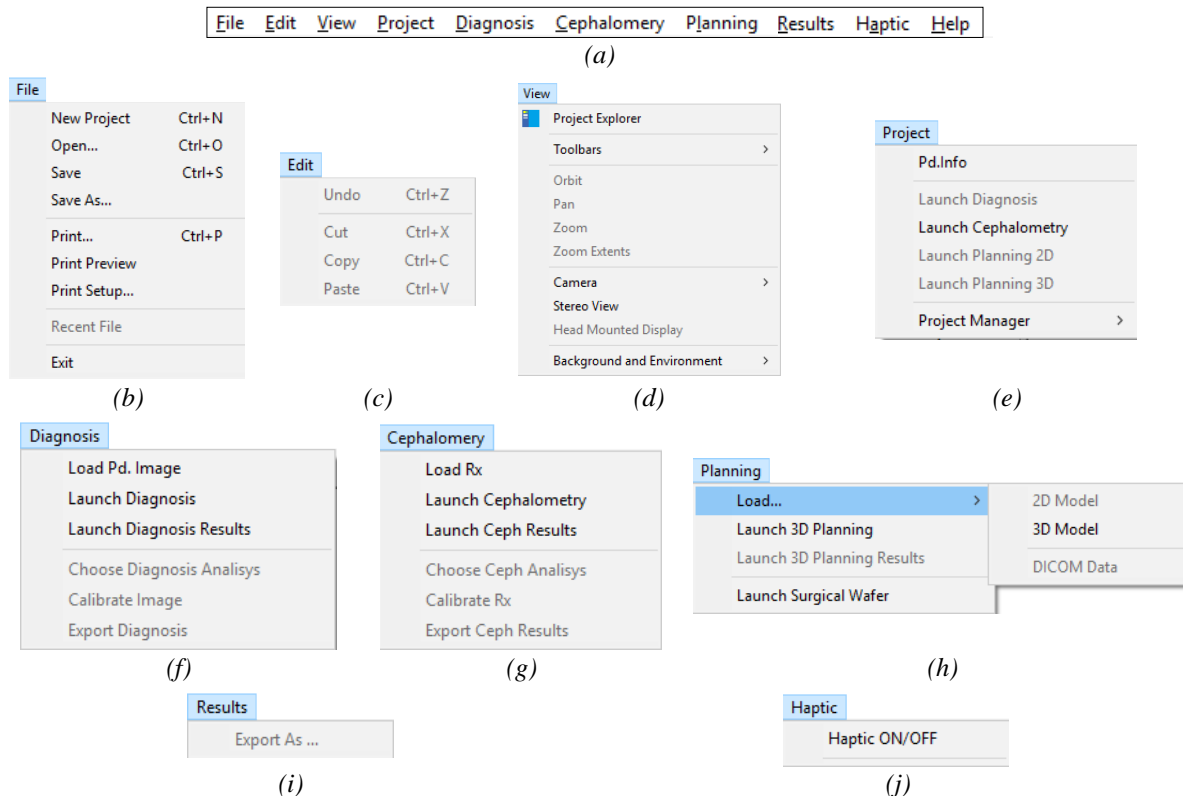


Figura 3.3 Menú principal y submenús de la plataforma OSSys v2.0: (a) menú principal, (b) menú new, (c) menú edit, (d) menú view, (e) menú project, (f) menú diagnosis, (g) menú cephalometry, (h) menú planning, (i) menú results, (j) menú haptic.

- File: permite la generación de un nuevo proyecto de planeación quirúrgica, así como la apertura de un proyecto existente. Las opciones guardar e impresión se encuentran también disponibles en este menú.
- Edit: contiene las funciones para copiar y pegar información.
- View: permite la visualización de la ventana de exploración de proyecto, la barra de herramientas de módulos de planeación, la visión estereoscópica del entorno virtual y la modificación del color de fondo d la ventana de ambiente virtual.
- Project: contiene el acceso a cada uno de los módulos principales de la plataforma OSSys v2.0. Además, permite acceder formulario de información clínica del paciente para su consulta y llenado.
- Diagnosis: permite acceder al módulo de análisis facial para generar el diagnóstico previo del paciente.
- Cephalometry: permite el acceso al módulo de cefalometría virtual y a sus herramientas.
- Planning: integra el acceso a los módulos de cirugía de modelos y de generación de férula quirúrgica.

- Results: permite exportar toda la información del plan quirúrgico a una ubicación especificada por el usuario.
- Haptic: permite activar o desactivar el renderizado háptico y retroalimentación táctil al usuario.

Barra de herramientas de planeación quirúrgica. Contiene un acceso rápido a las principales funciones del sistema y a los módulos de planeación quirúrgica. La Tabla 3.1 detalla cada apartado de la barra de herramientas.

Tabla 3.1 Funciones incluidas en la barra de herramientas de planeación quirúrgica.

Icono	Funcionalidad	Descripción
	Información del paciente	Permite acceder al formulario en el cual se almacena el historial clínico del paciente.
	Análisis facial	Brinda acceso al módulo de análisis facial desplegando la ventana de herramientas del módulo.
	Análisis cefalométrico	Despliega la ventana del módulo de análisis cefalométrico así como sus herramientas.
	Cirugía de modelos	Proporciona acceso al módulo de cirugía de modelos y a las herramientas implementadas para el seccionado y posicionamiento virtual.
	Generación de férula quirúrgica	Activa la ventana del módulo de generación de férula quirúrgica y sus herramientas.

Explorador del proyecto. Panel que muestra la secuencia en forma de árbol de la planeación quirúrgica ortognática, permitiendo el acceso a cada uno de los módulos. La Figura 3.4 muestra los elementos que conforman la ventana del explorador de proyecto.

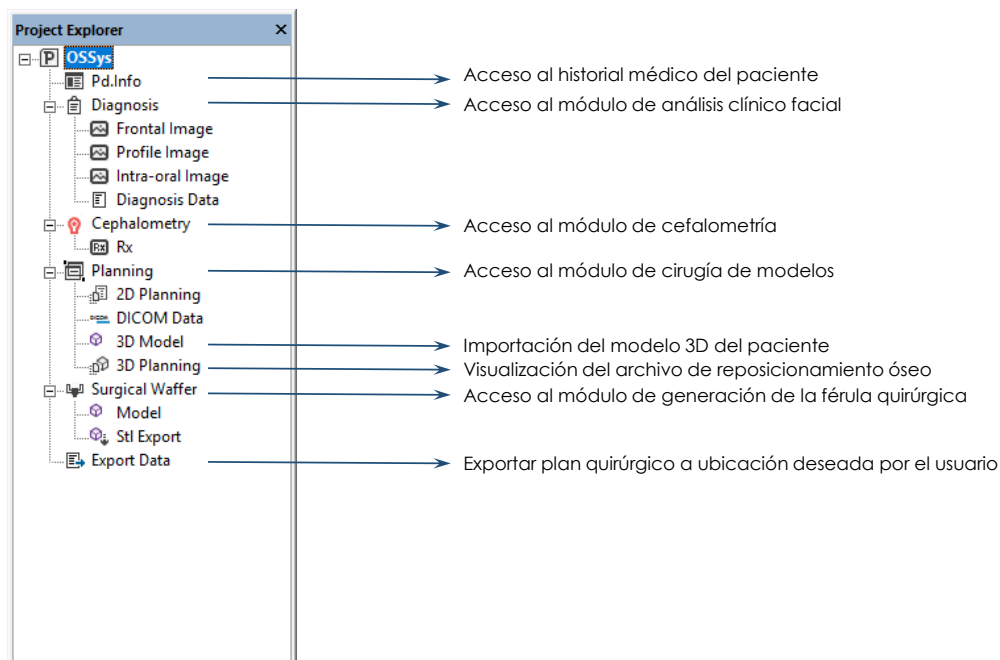


Figura 3.4 Panel de exploración de proyecto.

Entorno virtual. Es el espacio virtual generado por el módulo gráfico donde se lleva a cabo el proceso de planeación de la cirugía ortognática.

Ventana de herramientas del módulo seleccionado. Contiene las herramientas implementadas en cada módulo del proceso de planeación de la OGS.

### 3.3. Módulo gráfico

El módulo gráfico del sistema OSSys ha sido desarrollado utilizando las librerías de programación VTK 5.10.1 [211]. El módulo gráfico es responsable de renderizar el ambiente virtual en la interfaz gráfica del sistema. Además, es responsable del renderizado de los objetos virtuales en la escena virtual, la visualización de imágenes médicas, la actualización gráfica de la manipulación, así como el seccionado y reposicionamiento de los modelos virtuales. El módulo permite que las imágenes sean importadas en los formatos \*.jpg, \*.tiff y \*.png, y los modelos tridimensionales en los formatos \*.obj, y \*.stl.

Los objetos tridimensionales correspondientes a la anatomía ósea del paciente pueden ser adquiridos a partir de la reconstrucción de imágenes médicas en formato DICOM provenientes de la tomografía computarizada o resonancia magnética. La reconstrucción del modelo tridimensional del paciente es efectuada de manera externa al sistema OSSys v2.0 mediante la herramienta 3D Slicer® de licencia libre [124]. Los objetos tridimensionales son importados a la escena virtual en formato OBJ o STL como una superficie mallada con el objetivo de reducir el costo computacional asociado al procesamiento de objetos virtuales sólidos con geometrías complejas. La Figura 3.5(a) muestra la malla del modelo tridimensional del cráneo de un paciente y la Figura 3.5(b) muestra la visualización del modelo tridimensional en el ambiente virtual de OSSys v2.0.

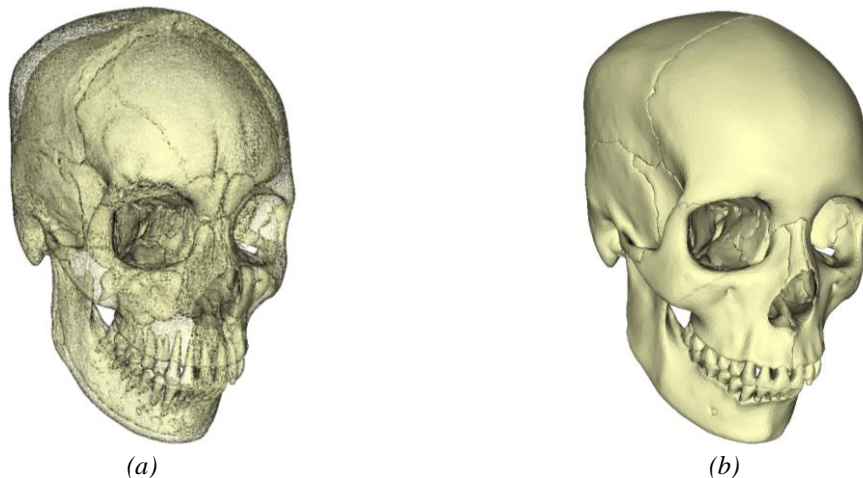


Figura 3.5 Modelo tridimensional reconstruido a partir de imágenes DICOM: (a) malla del modelo tridimensional, (b) visualización modelo tridimensional en el ambiente virtual de OSSys v2.0.

El modelo virtual del paciente es importado al entorno virtual, y alineado de forma automática haciendo coincidir su centro geométrico y ejes, con el origen y ejes de la escena virtual, Figura 3.6. La alineación de los sistemas coordenados se efectúa empleando el comando de VTK *AlignFrames* tras importar el modelo dentro de la interfaz gráfica y de forma previa al renderizado gráfico. El comando *AlignFrames* implementa de forma interna una matriz de transformación homogénea para alinear los sistemas coordenados de dos o más objetos virtuales.

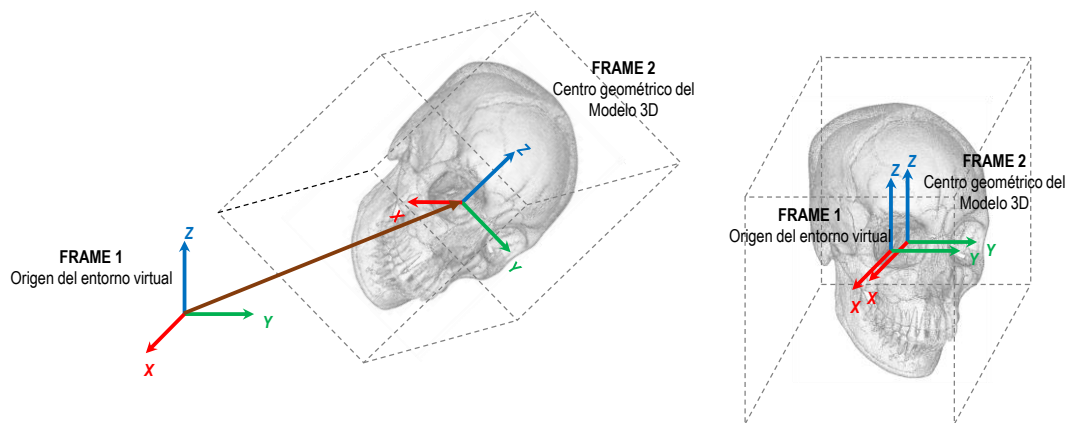


Figura 3.6 Alineación del modelo virtual del paciente sobre los ejes coordenados de la escena virtual.

La alineación del modelo 3D del paciente permite la visualización ortogonal del modelo del paciente. Además, brinda la capacidad de cuantificar de forma absoluta las coordenadas de puntos anatómicos que el usuario indique sobre el modelo tridimensional empleando la interfaz háptica, respecto al origen del entorno virtual. El uso del mismo sistema coordenado elimina la necesidad del uso de las matrices de rotación y traslación de coordenadas al importar el modelo tridimensional, ya que estas se encuentran implementadas en el comando *AlignFrames* empleado.

### 3.4 Módulo físico-háptico

El módulo físico-háptico se encuentra integrado al sistema mediante la implementación de las librerías de renderizado háptico H3D-API 2.2.0 [212] y las librerías de simulación física Bullet Physics 2.85<sup>®</sup> [213]. H3D-API y Bullet interactúan entre sí junto con el módulo gráfico para brindar al sistema la capacidad de retroalimentación dinámica (retroalimentación de fuerza y detección de colisiones) y la retroalimentación visual al usuario del proceso de manipulación de los objetos virtuales. El módulo físico-háptico permite el uso de varios dispositivos hápticos disponibles comercialmente, como el Phantom Omni de Sensable<sup>®</sup> o el Falcon de Novint<sup>®</sup>, Figura 3.7 [214, 215].

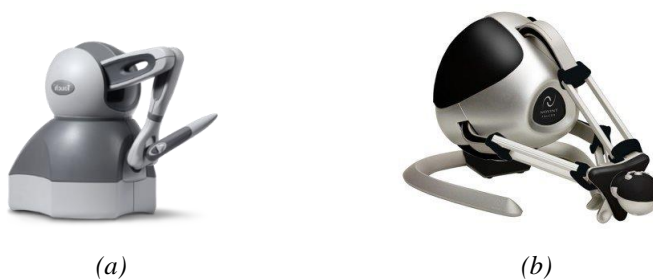


Figura 3.7 Dispositivos hápticos que pueden ser empleados en el sistema OSSys: (a) Phantom Omni de Sensable, (b) Novint Falcon.



Cada sección del módulo físico-háptico y el módulo gráfico se actualiza y sincroniza en cada intervalo de tiempo de simulación y con base a los requerimientos de la percepción humana [216-218]:

- *Actualización háptica.* Taza de actualización de 1 kHz.
- *Actualización física:* Actualización de 100 Hz.
- *Actualización gráfica:* Actualización de 60 Hz para lograr un movimiento continuo de los objetos virtuales en la pantalla.

Dentro del ambiente virtual el usuario tiene la capacidad de explorar de forma táctil los objetos virtuales, y detectar colisiones entre modelos virtuales empleando la interfaz háptica. Tras la generación de una representación gráfica en malla del modelo virtual del paciente por parte del módulo gráfico, el módulo físico-háptico se activa de forma automática y genera una representación háptica y una representación física, las cuales se traslapan al modelo gráfico y son invisibles para el usuario. Las representaciones física y háptica se crean a partir de las coordenadas de cada vértice de los elementos de la malla del modelo gráfico, donde a cada vértice se le asigna una partícula de masa y a cada arista un resorte que conecta las partículas de masa. La Figura 3.8 muestra los modelos generados en el ambiente virtual.

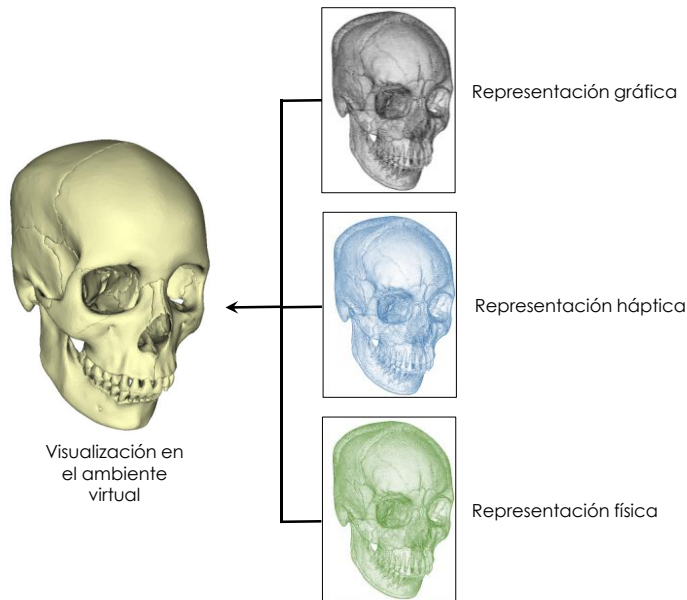


Figura 3.8 Modelos tridimensionales generados dentro del ambiente virtual.

La manipulación de los objetos virtuales sigue la secuencia que se presenta en la Figura 3.9 y comienza cuando el usuario toca el modelo virtual con el cursor háptico. Empleando el modelo físico masa-resorte-amortiguador (MRA) el sistema realiza el cálculo de fuerza de retroalimentación, la cual es transferida a la interfaz háptica permitiendo al usuario explorar la anatomía del modelo tridimensional del paciente. El modelo MRA está definido mediante la siguiente ecuación:

$$F - m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.1)$$

donde:

$F$ : fuerza de retroalimentación.

$m$ : masa.

$C$  : constante de amortiguamiento.

$k$  : constante elástica del resorte.

$\ddot{x}$ : aceleración de la masa.

$\dot{x}$ : velocidad de la masa.

$x$ : desplazamiento de la masa.

Durante la manipulación del modelo, el usuario puede presionar el botón principal de la plumilla del dispositivo háptico para permitir el desplazamiento y/o rotación del modelo virtual. El sistema actualiza la posición del cursor háptico y la compara con la posición y orientación previa para alimentar la matriz de transformación y actualizar la nueva posición del modelo, el cual se encuentra referenciado en su centro geométrico. La matriz de transformación, afecta la representación gráfica, física y háptica, por lo cual, ante cualquier cambio en la posición y orientación del modelo virtual, la representación gráfica, física y háptica se modifican a razón de la tasa de cambio de dirección y orientación definida por el usuario. Además, el sistema analiza mediante Physics Bullet si existe interferencia entre las representaciones físicas de dos o más modelos de la escena virtual. Si Bullet detecta la colisión o interferencia entre representaciones físicas el módulo físico-háptico calcula mediante el modelo MRA la fuerza de reacción entre los modelos virtuales. La fuerza de reacción es calculada a partir de la distancia que interfiere un objeto virtual a otro. Esta fuerza de reacción es retroalimentada al sistema háptico para ser renderizada al usuario, mientras que por su parte el módulo gráfico actualiza la nueva posición de los objetos.

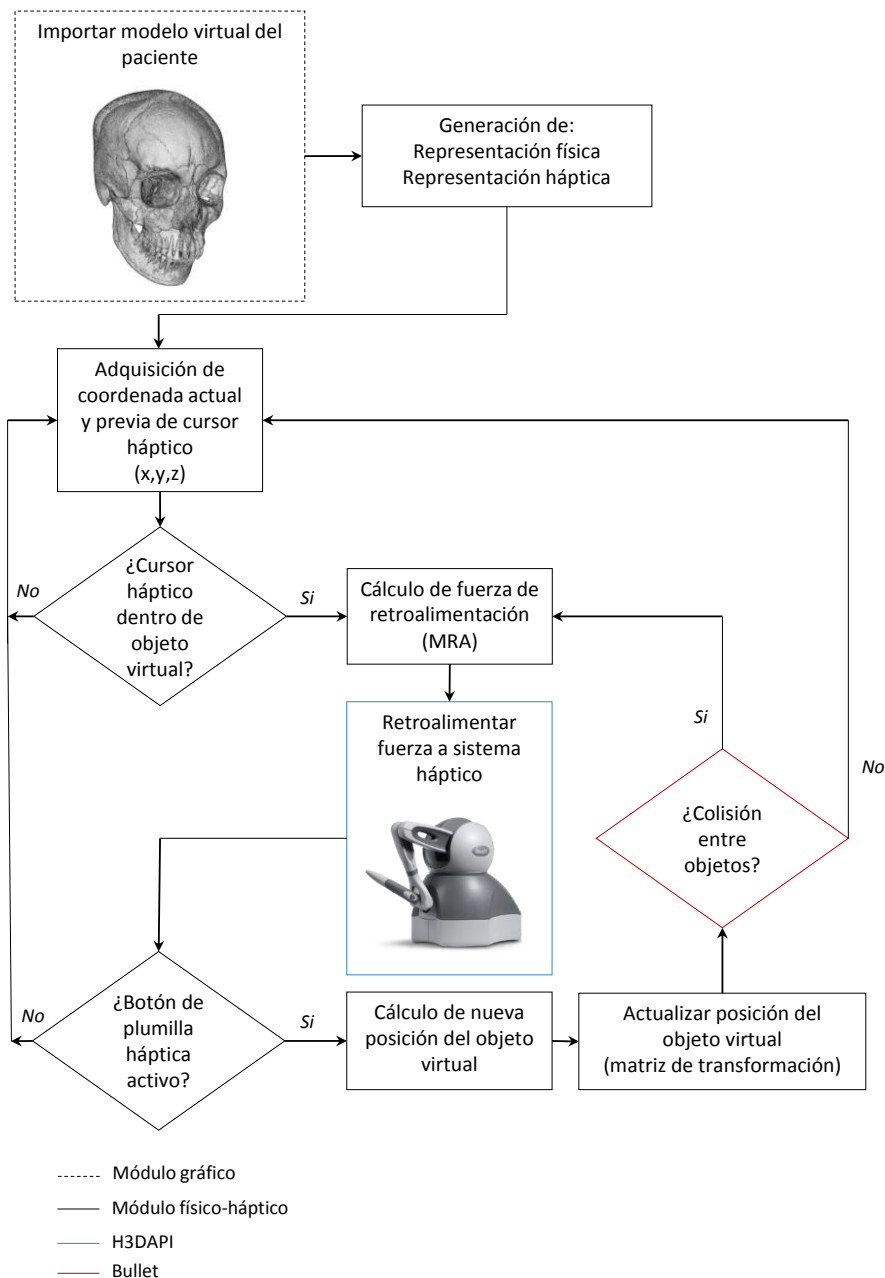


Figura 3.9 Secuencia de manipulación háptica de objetos virtuales.

### 3.5 Módulo de entrada y extracción de información quirúrgica

El módulo de entrada y extracción de información quirúrgica es responsable de almacenar de forma automática todos los datos relevantes del proceso de planeación quirúrgica dentro de cada una de sus etapas. Además es el encargado de generar el modelo resultante de la férula quirúrgica. Las principales funciones que integran este módulo se describen a continuación:

*Formulario de información médica del paciente.* Esta función se encuentra disponible desde el menú *Project* y el submenú *Pd.Info* de la barra de herramientas de OSSys v2.0, y permite al médico introducir la información

del paciente, incluyendo su historial clínico y estatus dental. El módulo almacena la información empleando el formulario mostrado en la Figura . Esta información puede ser exportada como un reporte en formato \*.xls, para su posterior lectura en cualquier sistema de cómputo.

The screenshot shows a window titled 'Pd.Info' with three tabs: 'General', 'Medical Records', and 'Dental Status'. The 'General' tab is active. It contains several input fields:

- Medical Team:** Maxillofacial, Anesthesiologist, Medical Id., Scrub nurse, Assistant, and Medical Id. (repeated).
- Basic Pd.Info:** First Name, Last Name, Age, Gender (Male/Female), Address, Phone, Advisor, and Allergies.
- Illment:** Chief complaint.

Buttons for 'OK' and 'Cancel' are located at the bottom right.

(a)

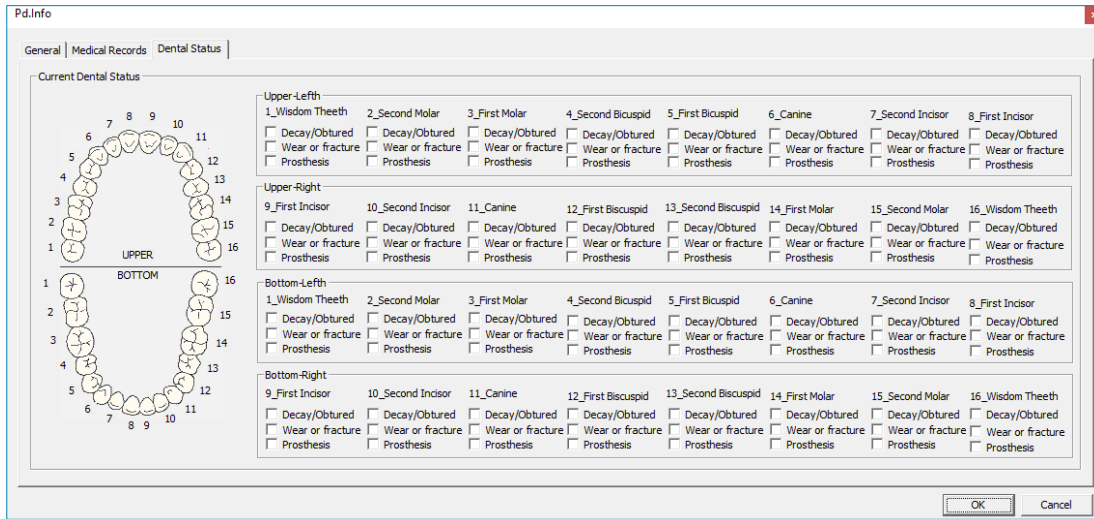
The screenshot shows the same 'Pd.Info' window, but with the 'Medical Records' tab active. It contains several sections:

- Vital Signs:** ASA, BP (mmHg), Temp (°C), Heartbeat, Breathing rate, Weight (Kg), Height (cm), and Last medical visit (Months).
- Pathological History:** A grid of conditions with checkboxes, including Liver disorders, Heart disease, Hypertension, Rheumatic fever, Blood transfusion, Anemia, Excessive bleeding, Fainting/seizures/epilepsy, Emotional/behavioral problems/depression, Cancer treatment, Tuberculosis, Persisten cough, Asthma, Sexually transmitted disease (STD), Thyroid disease, Kidney disease, Digestive problems, Diabetes, and Diabetes family members.
- Surgical Background:** Questions about recent hospitalization, other diseases, current drug use, and surgical procedures, each with 'Yes'/'No' checkboxes and a 'Reasons' text area.

Buttons for 'OK' and 'Cancel' are located at the bottom right.

(b)

Figura 3.10 Formulario de información clínica del paciente: (a) información general del paciente, (b) historial clínico del paciente, (c) estatus dental del paciente.



(c)

Figura 3.10 Formulario de información clínica del paciente: (a) información general del paciente, (b) historial clínico del paciente, (c) estatus dental del paciente; (continuación).

**Extracción de información y generación de reporte quirúrgico.** Esta función es responsable de extraer la información quirúrgica relevante generada en cada módulo de planeación quirúrgica virtual. La información relevante para cada etapa del proceso de planeación se detalla en la Tabla 3.2. Toda la información se extrae como un reporte en formato \*.xls, permitiendo al cirujano o especialista visualizar la información en cualquier sistema **de cómputo**.

Tabla 3.2 Información quirúrgica relevante en cada fase del proceso de planeación de OGS.

Etapa del proceso de planeación	Información adquirida
Análisis clínico facial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Imágenes del rostro del paciente.</li> <li>- Resultados del análisis de tercios y quintos faciales, y análisis de Powell.</li> <li>- Prediagnóstico facial acorde a cada análisis facial efectuado.</li> </ul>
Análisis cefalométrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Radiografía lateral del paciente.</li> <li>- Resultados de análisis cefalométrico acorde a las metodologías de análisis indicadas por el usuario.</li> <li>- Diagnóstico cefalométrico de acuerdo a cada metodología de análisis utilizada.</li> </ul>
Cirugía de modelos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Metodología de fractura quirúrgica de OGS requerida por el paciente (LeFort I, LeFort II, BSSO y/o genioplastia).</li> <li>- Desplazamiento requerido de cada segmento óseo del paciente (avance, retroceso, desplazamiento lateral, rotación).</li> </ul>

**Generación de modelo resultante de férula quirúrgica.** Esta función se apoya de los comandos de VTK para extraer en formato \*.STL el resultado final de la generación de férula quirúrgica. El formato STL (STereoLitography) permite al usuario la fabricación de la férula quirúrgica empleando la tecnología de fabricación de manufactura aditiva (additive manufacturing, AM) a partir del modelo virtual de la férula.

### 3.6 Generación de proyecto de planeación quirúrgica virtual

El proceso de generación de un proyecto de planeación quirúrgica de OGS empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 comienza desde la opción New del menú principal, en donde se despliega la ventana de exploración de archivos. Dentro de la ventana de exploración de archivos, el usuario selecciona la ubicación

digital en la cual el proyecto será generado y define el nombre del proyecto de planeación virtual de OGS para cada paciente, Figura 3.11. Al instante de generar un nuevo proyecto de planeación se crea de forma automática una carpeta digital con el nombre del proyecto la cual contiene cuatro sub-carpetas digitales, Figura 3.12. Las carpetas contenidas en el proyecto son Ceph, Diagnosis, PdData y Planning. Cada subcarpeta está destinada a almacenar la información relevante en cada fase del proceso de planeación, la cual corresponde a la Tabla 3.2 mostrada previamente.

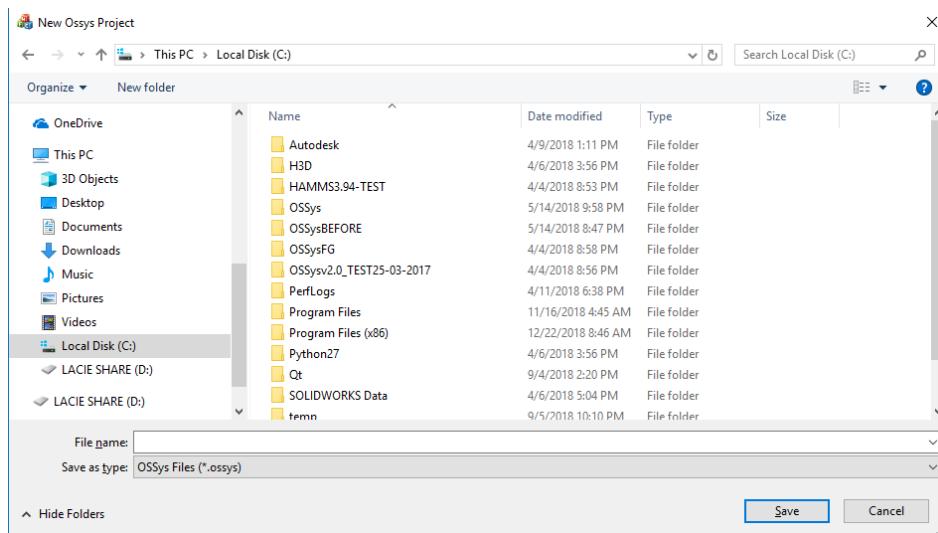


Figura 3.11 Ventana de exploración de archivos.

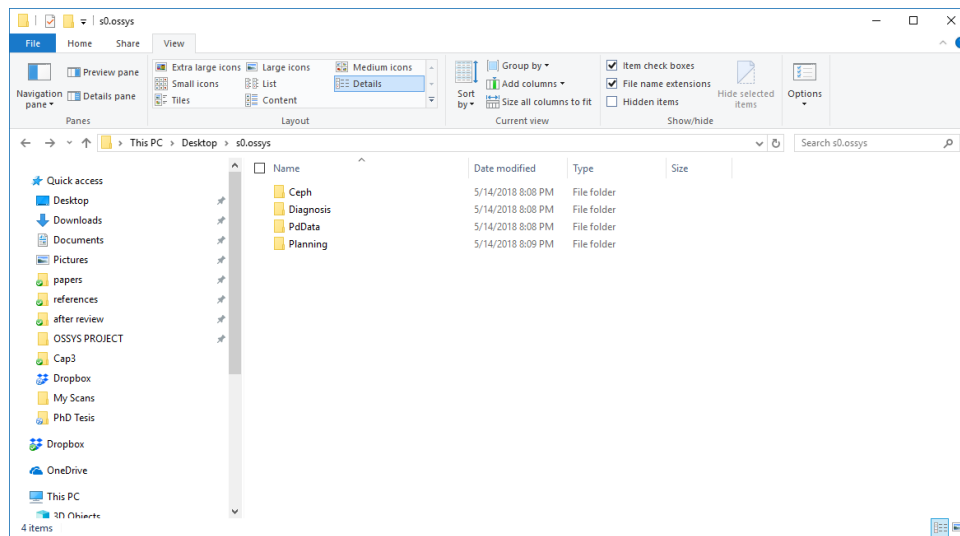


Figura 3.12 Sub-carpetas digitales generadas al crear un proyecto de planeación de OGS.

Una vez generado un nuevo proyecto, el usuario tiene acceso a cada uno de los módulos de planeación de OGS y a las herramientas contenidas en cada módulo. Posterior a la creación de un nuevo proyecto, el cirujano puede proceder capturar la información médica del paciente. El acceso al formulario de información médica del paciente es posible desde el menú *Project* y el submenú *Pd. Info*. Seguido de la captura de la información

médica del paciente, el usuario puede acceder al módulo de análisis facial desde el menú *Diagnosis* y el submenú *Launch diagnosis* para desplegar el panel de herramientas del módulo de análisis facial e importar las imágenes del paciente para su análisis.

Posterior al análisis facial y una vez obtenido un diagnóstico previo del paciente, el cirujano puede proceder a desplegar el panel del módulo de análisis cefalométrico desde el menú *Cephalometry* y el submenú *Launch cephalometry* del menú principal. Al desplegar el panel de cefalometría el especialista puede importar al entorno virtual la radiografía del paciente para llevar a cabo el análisis cefalométrico. En el capítulo 4 se presenta de forma detallada el proceso de análisis facial y cefalométrico empleando la plataforma propuesta OSSys v2.0, así como las herramientas implementadas en los módulos de análisis facial y análisis cefalométrico virtual.

A partir del diagnóstico ortognático del paciente, el cirujano puede acceder al módulo de cirugía de modelos desde la opción *Planning* del menú principal, e introducir el modelo tridimensional del paciente para realizar la cirugía de modelos mediante el segmentado del modelo virtual y reposicionamiento de los segmentos óseos virtuales. Posterior a la cirugía de modelos, el cirujano puede obtener el modelo tridimensional de férula quirúrgica de forma semiautomática empleando las herramientas del módulo de generación de férula quirúrgica, las cuales son desplegadas desde el submenú *Launch surgical wafer* que se encuentra en el menú *Planning* del menú principal. El capítulo 5 presenta de forma detallada las herramientas implementadas en los módulos de cirugía de modelos y generación de la férula quirúrgica, así como el proceso para ejecutar la cirugía de modelos y generar la plantilla quirúrgica en OSSys v2.0.

La Figura 3.13 muestra los paneles de herramientas de cada uno de los módulos principales de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0, cuyas características y funcionamiento se detallan en los capítulos capítulo 4 y capítulo 5.

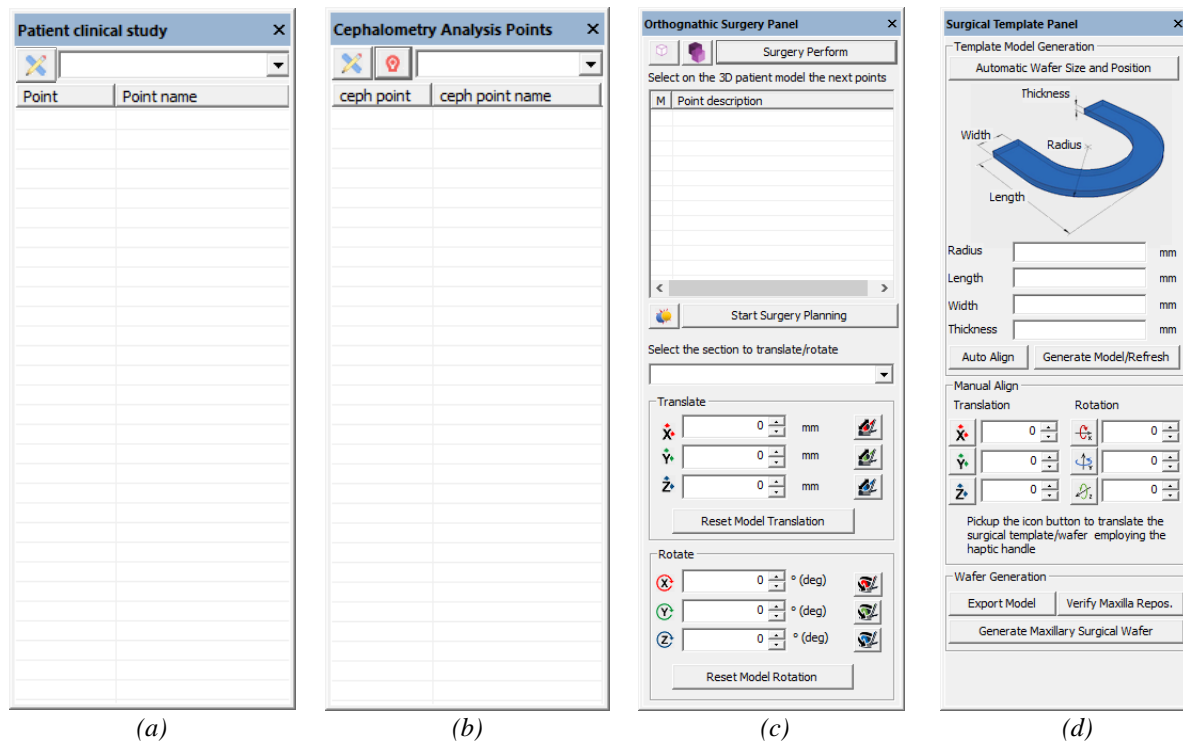


Figura 3.13 Panel de herramientas de cada uno de los cuatro principales módulos de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0: (a) panel del módulo de análisis facial, (b) panel del módulo de análisis cefalométrico, (c) panel del módulo de cirugía de modelos, (d) panel de generación de férula quirúrgica.

### 3.7 Evaluación informática del sistema

Con la finalidad de evaluar los requerimientos informáticos de la plataforma propuesta OSSys v2.0 se realizó un análisis de rendimiento del sistema. El análisis del rendimiento de OSSys v2.0 se efectuó midiendo los recursos informáticos empleados para desempeñar las tareas clave del proceso de planeación virtual de OGS. Las tareas se seleccionaron de acuerdo con la secuencia de planeación y las herramientas empleadas por cada módulo que integra OSSys v2.0.

El proceso de evaluación consistió en determinar el tiempo promedio de ejecución de las tareas seleccionadas, el porcentaje medio de uso del procesador y la cantidad de memoria de acceso aleatorio (RAM) empleada durante la ejecución de cada tarea, en 30 ocasiones. Para efectuar las pruebas que involucran la necesidad de la radiografía computarizada y modelo 3D del paciente, se emplearon las mostradas en Figura 3.14, en la cual el modelo 3D contiene 686 712 vértices y 228 904 elementos.





(a)



(b)

Figura 3.14 Información médica empleada en la evaluación del rendimiento de la plataforma OSSys v2.0: (a) radiografía digital del paciente, (b) modelo 3D.

Las pruebas de rendimiento de la plataforma propuesta se realizaron un equipo de cómputo con procesador Intel® Core i5@3.10GHz, 8GB de memoria RAM, tarjeta de video NVIDIA® GeForce GTX745 de 4GB y sistema operativo Windows 10. Con la intención de evitar que el equipo de cómputo empleado durante el análisis hiciera uso de un procesamiento multinúcleo, se modificaron las opciones de arranque del equipo limitando el uso de un solo núcleo de procesamiento en todo momento y suprimiendo el uso de la tarjeta de video.

Cada tarea del proceso de evaluación se efectuó en 30 ocasiones, registrando los recursos informáticos de cada tarea. Para medir los recursos informáticos, se empleó la herramienta del gestor de procesos del administrador de tareas de Windows. Los resultados promedio de la prueba de rendimiento efectuada se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Recursos informáticos promedio requeridos por la plataforma virtual OSSys v2.0 para la ejecución de diversas tareas del proceso de planeación virtual de OGS.

Tarea ejecutada	Tiempo promedio de ejecución en milisegundos	Porcentaje promedio de uso del procesador	Cantidad de memoria empleada (MB)
Apertura de la plataforma OSSys v2.0	12	19.1 (0.5921 GHz)	42.6
Modo en espera del sistema OSSys v2.0	-	2.7 (0.0837 GHz)	39.3
Generación de un nuevo proyecto	7	3.2 (0.0992 GHz)	39.6
Apertura de módulo		23.8 (0.73 GHz)	39.4
Carga y renderizado de imágenes	14	3.9 (0.12 GHz)	43.8
Cálculo de los resultados de análisis facial y cefalométrico.	23	17.8 (0.5518 GHz)	-

*Tabla 3.3 Recursos informáticos promedio requeridos por la plataforma virtual OSSys v2.0 para la ejecución de diversas tareas del proceso de planeación virtual de OGS, (continuación).*

<b>Tarea ejecutada</b>	<b>Tiempo promedio de ejecución en milisegundos</b>	<b>Porcentaje promedio de uso del procesador</b>	<b>Cantidad de memoria empleada (MB)</b>
Carga y renderizado gráfico, físico y háptico del modelo virtual del paciente.	204 083 (3.4 min)	62.8 (1.94 GHz)	1476.8
Seccionado y renderizado, gráfico, físico y háptico de los segmentos virtuales.	349 800 (5.8 min)	65.3 (2.02 GHz)	1478.8
Generación automática del modelo de férula quirúrgica.	27	26.4 (0.8184 GHz)	179
Generación del grabado oclusal.	756 523 (12.6 min)	54.1 (1.677 GHz)	753.8

### **3.7.1 Discusión de resultados**

A partir de los resultados obtenidos es posible determinar los recursos mínimos que debe ofrecer un equipo de cómputo para ejecutar la plataforma-virtual háptica OSSys v2.0. Los recursos mínimos se basan en los máximos recursos de procesamiento y de memoria RAM requerida por la plataforma propuesta. Por lo tanto, un equipo que ofrezca un mínimo de 2.1 GHz de procesamiento y una memoria RAM de 2GB es capaz de ejecutar la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

Además, es posible identificar las tareas que demandan un mayor consumo de recursos computacionales, las cuales corresponden a: la carga y renderizado gráfico, físico y háptico del modelo del paciente, el seccionado y renderizado gráfico, físico y háptico de los segmentos virtuales y, la generación del grabado oclusal. Las tareas que demandan una mayor cantidad de recursos informáticos son un foco de atención para la optimización de la ejecución de estas tareas.

## **Capítulo 4. Análisis morfológico y diagnóstico virtual en cirugía ortognática**

En este capítulo se presenta el desarrollo de las herramientas y algoritmos de análisis morfológico facial y diagnóstico virtual que se incluyen en la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0. Estas herramientas constituyen los módulos de análisis facial y cefalometría virtual. Además, se presenta la evaluación y el análisis de resultados del módulo de cefalometría facial.

### **4.1 Análisis facial virtual**

El estudio de la morfología facial en la cirugía ortognática comprende el análisis facial del paciente y el análisis cefalométrico. En la primera fase del proceso de planeación de cirugía ortognática el cirujano efectúa el análisis clínico de la estructura facial del paciente a partir de fotografías frontales y laterales de rostro. Las metodologías de análisis facial incluyen el análisis de tercios y quintos faciales sobre la fotografía de perfil y frontal del paciente, respectivamente. Los análisis de tercios y quintos faciales proporcionan al cirujano una perspectiva inicial de la armonía facial del paciente permitiéndole identificar el crecimiento excesivo o deficiente de las estructuras óseas del rostro de forma cualitativa. Además, el estudio clínico facial incluye la metodología de análisis de Powell. El análisis de Powell proporciona al cirujano un diagnóstico previo de la problemática del paciente al evaluar la relación de las estructuras del perfil facial y comparar los resultados obtenidos con estándares de armonía facial preestablecidos para determinar el método de tratamiento, el cual puede ser quirúrgico o mecánico mediante ortodoncia.

Tradicionalmente el desarrollo de las metodologías de análisis clínico facial se efectúa sobre fotografías del paciente impresas de forma física las cuales son analizadas empleando una regla y un transportador de uso común. En el módulo de análisis facial de la plataforma virtual-háptica OSSys se han implementado herramientas que permiten realizar el análisis de tercios, quintos faciales y análisis de Powell de manera virtual sin la necesidad de que el médico efectúe la medición de forma tradicional, requiriendo solamente la identificación de puntos anatómicos por parte del cirujano sobre la fotografía virtual del paciente.

El proceso general del análisis clínico facial en la plataforma virtual-háptica OSSys se muestra en la Figura 4.1 El procedimiento comienza al importar las fotografías lateral y frontal del rostro del paciente. Posteriormente el usuario selecciona la metodología de análisis a efectuar y define sobre la fotografía del paciente los puntos anatómicos que se indican en el panel principal del módulo de análisis facial. La plataforma OSSys permite al usuario definir los puntos anatómicos empleando el ratón de computadora o el dispositivo háptico. La Figura 4.2 muestra los puntos anatómicos requeridos para cada metodología de análisis facial. Una vez que los puntos anatómicos son definidos, el módulo de análisis facial calcula las proporciones faciales para cada metodología seleccionada.

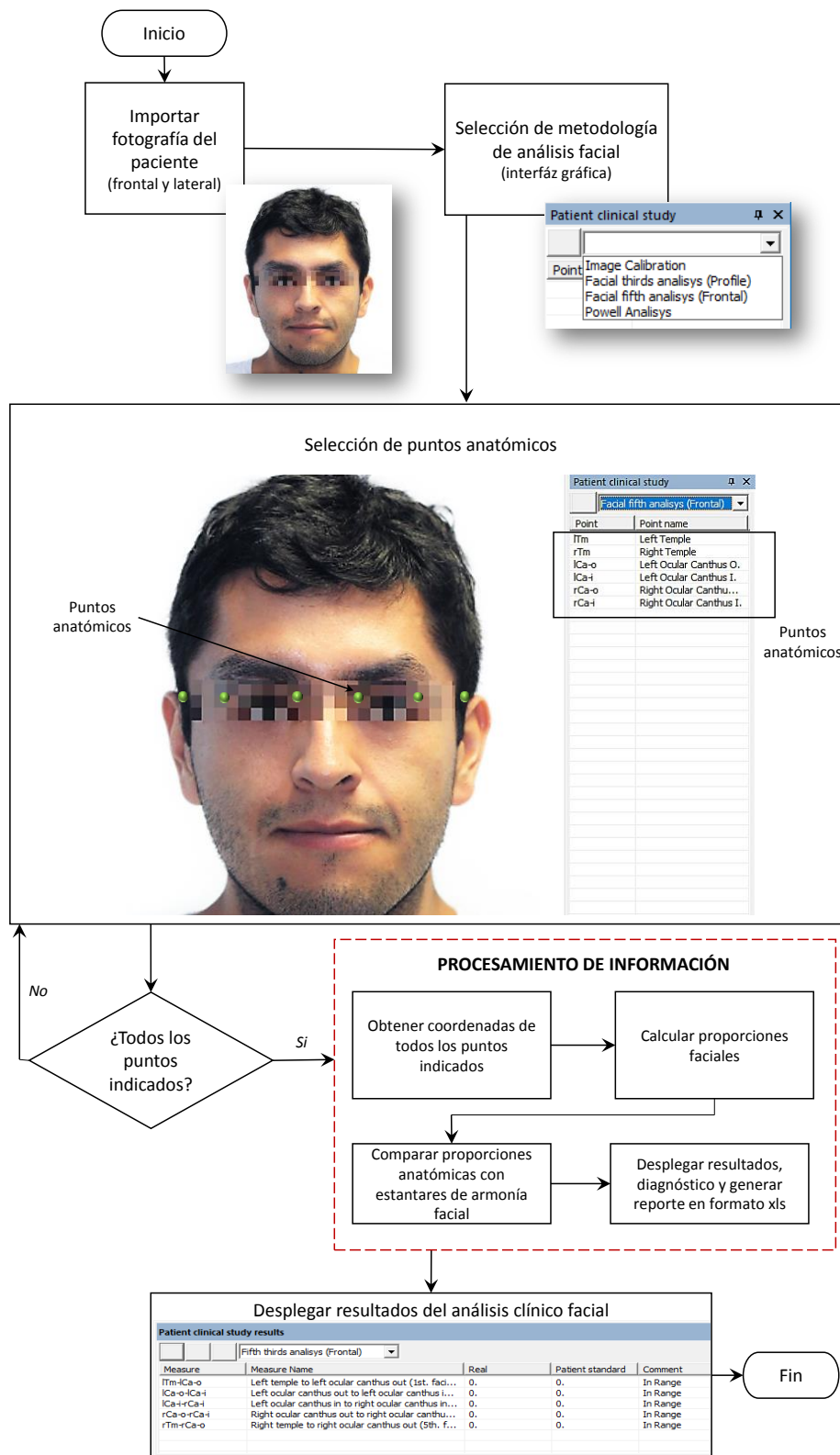


Figura 4.1 Proceso general del análisis facial empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

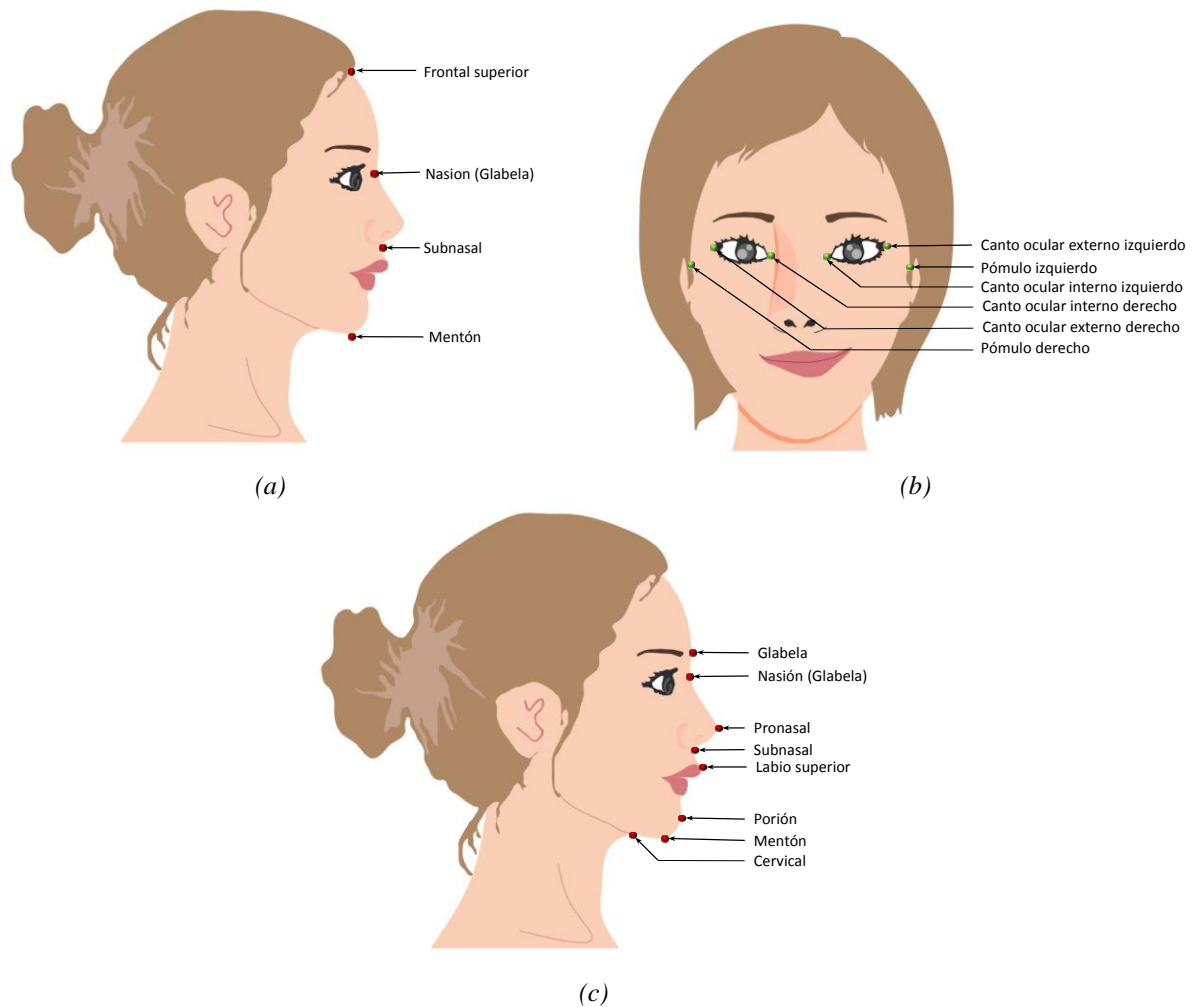


Figura 4.2 Puntos anatómicos requeridos por el módulo de análisis facial de acuerdo a: a) metodología de tercios faciales, b) metodología de quintos faciales, y c) análisis de Powell.

A partir de las proporciones faciales ideales del paciente, el módulo obtiene la longitud entre puntos adyacentes los cuales representan cada tercio o quinto facial del paciente. A continuación, ambas proporciones son comparadas de forma automática permitiendo una variación del 10% entre la proporción real e ideal. Posteriormente el módulo despliega el resultado de la comparativa indicando si existe un incremento, decremento o se satisfacen los requerimientos para cada proporción del rostro del paciente.

Para el proceso de cálculo del análisis Powell el módulo de análisis facial adquiere las coordenadas de cada punto anatómico facial indicado por el usuario. A partir de las coordenadas de cada punto anatómico, el módulo calcula los ángulos nasofacial, nasomental, nasolabial y mentocervical del paciente mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \tan^{-1} \left[ \frac{m_2 - m_1}{1 + m_1 m_2} \right] \quad (4.2)$$

donde  $\beta$  es el ángulo entre dos rectas,  $m_1$  es la pendiente de la recta 1, y  $m_2$  es la pendiente de la recta 2. La resultante del cálculo de los ángulos faciales es comparada con el estándar médico de armonía facial mostrado en la Figura 4.3.

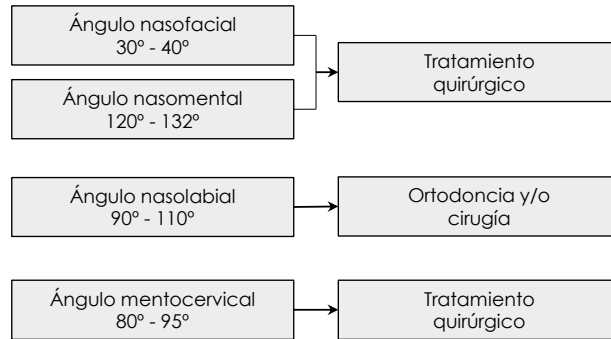


Figura 4.3 Estándar de armonía facial empleado en el análisis de Powell.

Una vez obtenida la comparativa de valores faciales el módulo despliega el resultado en el panel de resultados junto con el prediagnóstico clínico generado. Este prediagnóstico sugiere al médico el tipo de tratamiento a efectuar para corregir la problemática del paciente. También se genera de forma automática un archivo en formato xls conteniendo los resultados de cada una de las metodologías del análisis facial del paciente. La Figura 4.4 muestra el informe de resultados generado en la fase de análisis facial.

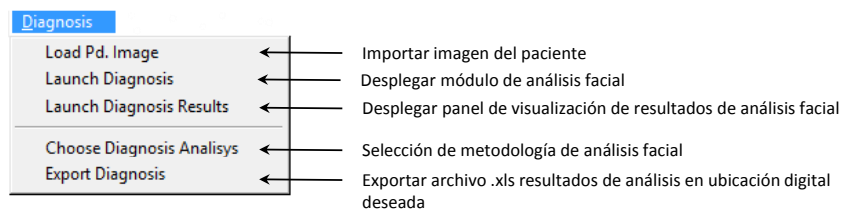
Las principales características del módulo de análisis facial son las siguientes:

- Las imágenes del paciente pueden ser importadas en cualquier formato estándar de imagen.
- Las metodologías de análisis facial de tercios, quintos faciales y análisis de Powell se encuentran integradas.
- Los puntos de referencia anatómicos pueden ser indicados por el usuario empleando el ratón de computadora o el dispositivo háptico.
- El módulo calcula automáticamente los resultados del análisis, y lo muestra de forma automática al finalizar la señalización de puntos anatómicos.
- De acuerdo con cada metodología de análisis y los resultados del análisis, un prediagnóstico clínico se genera de forma automática mostrando si se recomienda un tratamiento quirúrgico o de ortodoncia.
- Los resultados del análisis y prediagnóstico se almacenan en un informe de resultados en formato xls.

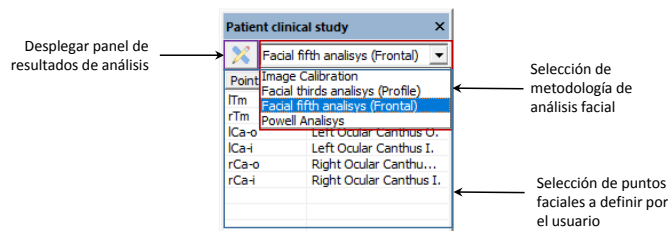
<b>OSSys v2.0</b>					
<b>Thirds Analisis Results</b>					
Facial length (mm)	223.54				
Upper facial third	35%				
Middle facial third	32%				
Bottom facial third	33%				
Diagnosis					
<b>Fifth Analisis Results</b>					
Facial width (mm)	183.94				
Extern right facial fifth	15%	Fifth diminished			
Central right facial fifth	22%				
Central fifth	25%	Fifth increased			
Central left facial fifth	21%				
Extern left facial fifth	16%	Fifth diminished			
Diagnosis		Fifths non equals, perform a cephalometry analysis is suggested			
<b>Powell Analisis Results</b>					
Measure	Patient	Standard	Diagnosis		
Naso-facial angle	44.7	30-40	Surgical treatment		
Nasal-maxilla angle	133.4	120-132			
Nasal-lip angle	95	90-110			
Cervical-jaw angle	83.4	80-95			

Figura 4.4 Informe de resultados generado de forma automática tras efectuar el análisis facial en OSSys v2.0.

El acceso a las herramientas del módulo de análisis facial se realiza a partir de la opción *Launch Diagnosis* del apartado *Diagnosis* del menú principal de OSSys v2.0. La Figura 4.5 muestra los paneles asociados al módulo de análisis facial, las herramientas y menús que lo integran.

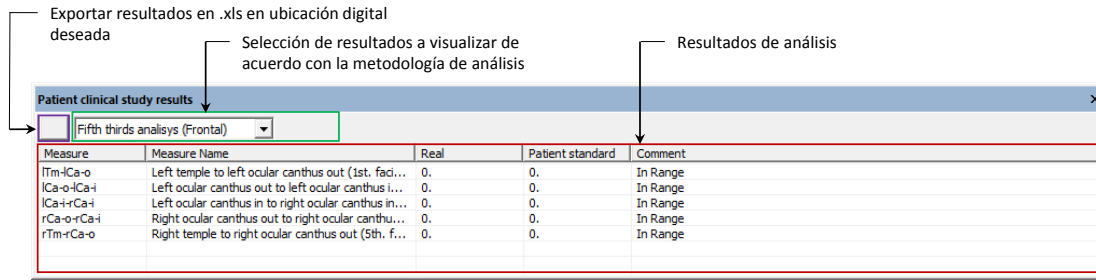


(a)

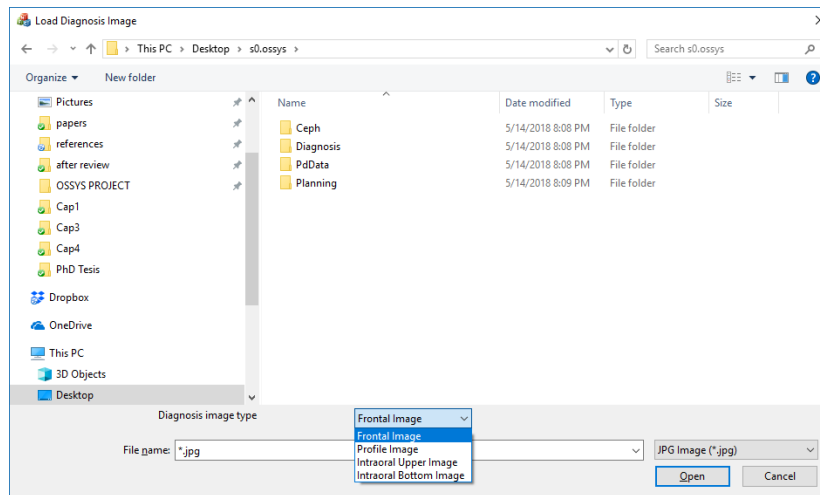


(b)

Figura 4.5 Interfaz gráfica del módulo de análisis facial: a) menú *Diagnosis* de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas, y c) panel de resultados, y d) ventana de explorador de archivos para la carga de imágenes del paciente.



(c)



(d)

Figura 4.5 Interfaz gráfica del módulo de análisis facial: a) menú Diagnosis de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas, y c) panel de resultados, y d) ventana de explorador de archivos para la carga de imágenes del paciente, (continuación)

## 4.2 Análisis cefalométrico virtual

Posterior al proceso de análisis facial, el proceso de planeación de cirugía ortognática considera el estudio de la morfología ósea del paciente a través del análisis cefalométrico. El análisis cefalométrico proporciona información cuantitativa de las relaciones óseas de la región facial, y le permite conocer la patología de desalineación maxilar para generar un diagnóstico definitivo. Tradicionalmente el proceso de cefalometría consiste en la identificación de puntos cefalométricos sobre la radiografía lateral de cráneo del paciente. A partir de cada punto cefalométrico, el médico obtiene relaciones angulares y dimensionales empleando herramientas manuales de medición que le permiten generar la descripción del patrón facial del paciente. El patrón facial obtenido es comparado con un grupo de referencias estándar correspondientes a su grupo étnico.

La plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 integra el módulo de cefalometría virtual el cual permite generar el proceso de análisis cefalométrico en un ambiente virtual asistido por computadora. Las herramientas que se integran en el módulo de cefalometría brindan al usuario la capacidad de efectuar diversas metodologías de análisis cefalométrico de forma simultánea. Las metodologías implementadas en el módulo de análisis cefalométrico son:



- McNamara.
- Burstone & Legan.
- Steiner.
- Jaraback.
- Downs.
- Ricketts.
- Trujillo.
- Fonseca.

Estas metodologías de análisis son las que se usan comúnmente en la planeación de cirugías ortognáticas. A partir de la identificación de puntos cefalométricos sobre la radiografía digital del paciente, el módulo de cefalometría efectúa el cálculo de las relaciones óseas de forma automática y despliega el resultado al cirujano. Una característica importante de este módulo es la generación automática de un diagnóstico cefalométrico generado a partir de la comparación de los resultados cefalométricos y las normas cefalométricas correspondientes a cada metodología de análisis. Los resultados y diagnóstico cefalométrico se almacenan automáticamente en un reporte en formato xls.

El proceso general de análisis cefalométrico empleando la plataforma virtual háptica OSSys v2.0 se muestra en la Figura 4.6 El procedimiento comienza al importar la radiografía del paciente en cualquiera de los formatos de imagen común. Posteriormente el cirujano procede a efectuar la calibración de la radiografía indicando la opción “*Rx. Calibration*” en el panel de herramientas del módulo e indicando sobre la escala lineal que se encuentra a un costado de la radiografía dos puntos de referencia, Figura 4.7. El sistema despliega la ventana de calibración y el cirujano introduce la distancia que existe entre los puntos de referencia señalados y que corresponde a la indicada por la escala gráfica de la radiografía. Una vez calibrada la radiografía el módulo calcula automáticamente un factor de corrección empleando la siguiente ecuación:

$$cf = \frac{D_{real}}{\sqrt{y_{V-ref2}^2 + y_{V-ref1}^2}} \quad (4.3)$$

donde  $cf$  es el factor de corrección,  $D_{real}$  la dimensión real,  $y_{V-ref2}$  la coordenada virtual y del punto final de referencia,  $y_{V-ref1}$  la coordenada virtual y del punto inicial de referencia. El factor de corrección se utiliza para corregir las dimensiones de las relaciones óseas que se realizarán en cada metodología cefalométrica.

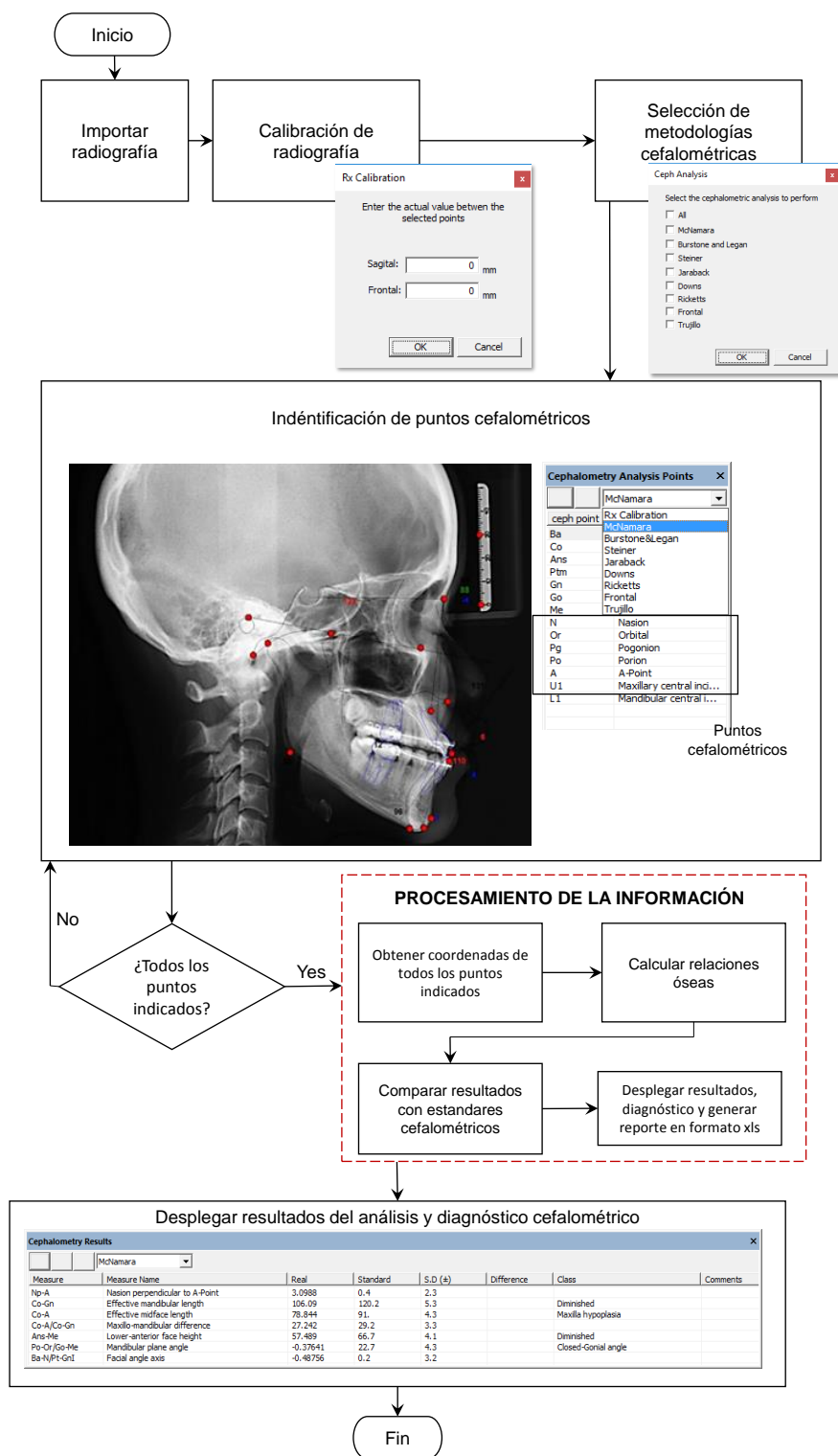


Figura 4.6 Proceso general del cefalometría virtual empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

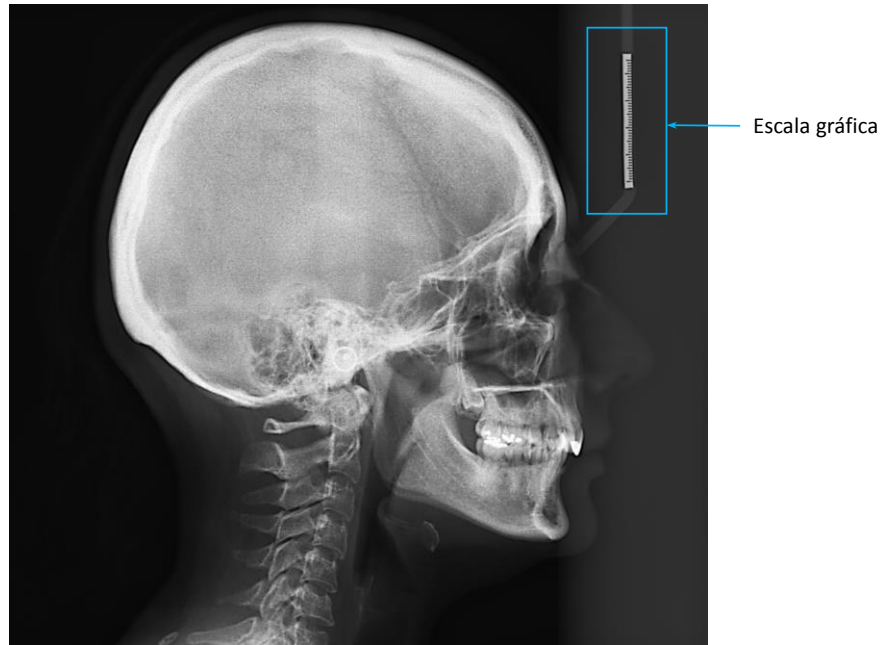


Figura 4.7 Escala gráfica de la radiografía lateral de cráneo.

Posterior a la calibración de la radiografía, el usuario procede a desplegar la ventana de selección de análisis cefalométrico para seleccionar las metodologías cefalométricas a realizar. A partir de las metodologías seleccionadas el sistema enlista los puntos cefalométricos que el cirujano debe identificar. La identificación de los puntos cefalométricos se efectúa sobre la radiografía digital del paciente utilizando el ratón de computadora o el dispositivo háptico. Después de identificar todos los puntos cefalométricos el módulo adquiere las coordenadas cada punto cefalométrico y calcula las relaciones óseas de acuerdo a cada metodología las siguientes ecuaciones correspondientes a la distancia entre dos puntos, punto de intersección entre dos rectas y la distancia perpendicular de un punto a una recta:

$$d_{p1p2} = cf \cdot \sqrt{(Xp2 - Xp1)^2 + (Yp2 - Yp1)^2} \quad (4.4)$$

donde  $d_{p1p2}$  es distancia entre dos puntos cefalométricos,  $cf$  es el factor de corrección de escala,  $Xp1$  la coordenada en x del punto inicial de la recta,  $Yp1$  la coordenada en y del punto inicial de la recta,  $Xp2$  es coordenada en x del punto final de la recta, y  $Yp2$  la coordenada en y del punto final de la recta.

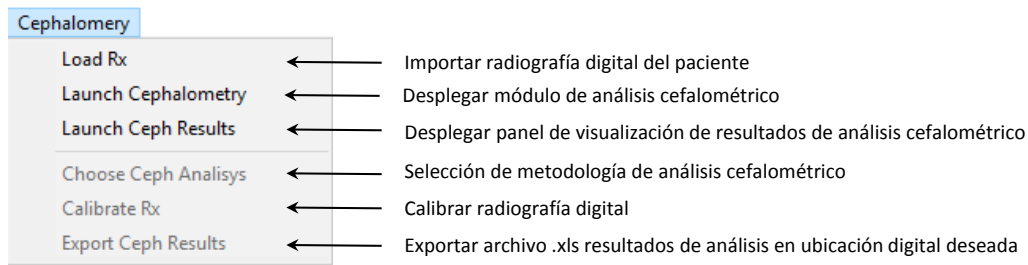
$$X_{pi} = \frac{b_2 - b_1}{m_1 - m_2}, \quad Y_{pi} = m_1 X_{pi} + b_1 \quad (4.5)$$

donde  $X_{pi}$  es la coordenada en x del punto de intersección de dos rectas,  $Y_{pi}$  es coordenada en y del punto de intersección de dos rectas,  $b_1$  la intersección sobre el eje y de la recta 1,  $b_2$  la intersección sobre el eje y de la recta 2,  $m_1$  la pendiente de la recta 1, y  $m_2$  es la pendiente de la recta 2.

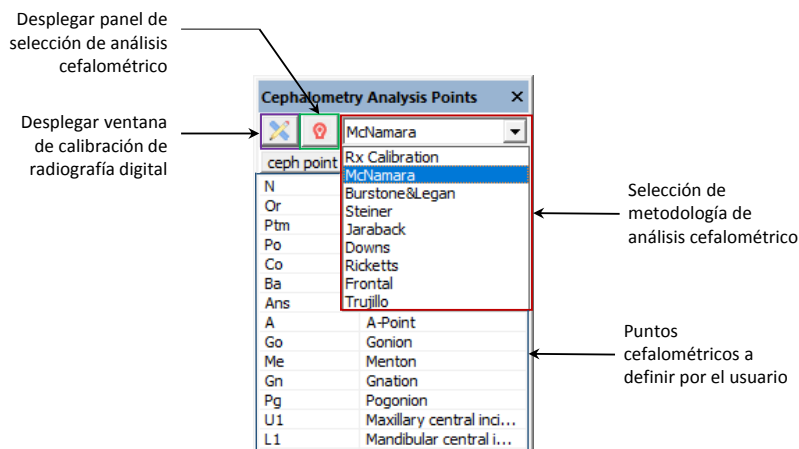
$$d_{p4-recta1} = cf \frac{m_2 X_{p3} - Y_{p3} + b_2}{\sqrt{m_2 + 1}} \quad (4.6)$$

donde  $d_{p4-recta1}$  es distancia perpendicular de un punto a una recta,  $cf$  el factor de corrección de escala,  $X_{p3}$  es la coordenada en x del punto,  $Y_{p3}$  la coordenada en y del punto,  $b_2$  la intersección sobre el eje y de la recta perpendicular a otra, y  $m_2$  es la pendiente de la recta perpendicular a otra.

El acceso a las herramientas del módulo de cefalometría se realiza a partir de la opción *Launch Ceph* del apartado *Cephalometry* del menú principal de OSSys v2.0. La Figura 4.8 muestra los paneles asociados al módulo de cefalometría, las herramientas y menús que lo integran.

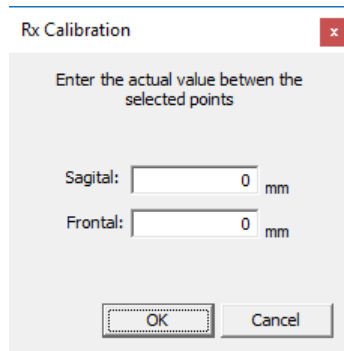


(a)

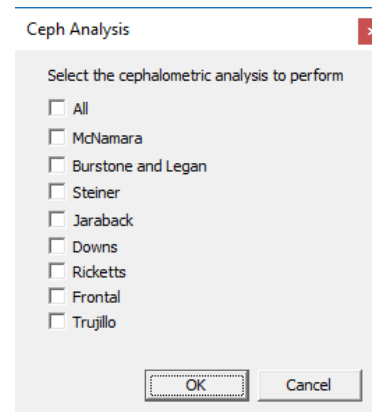


(b)

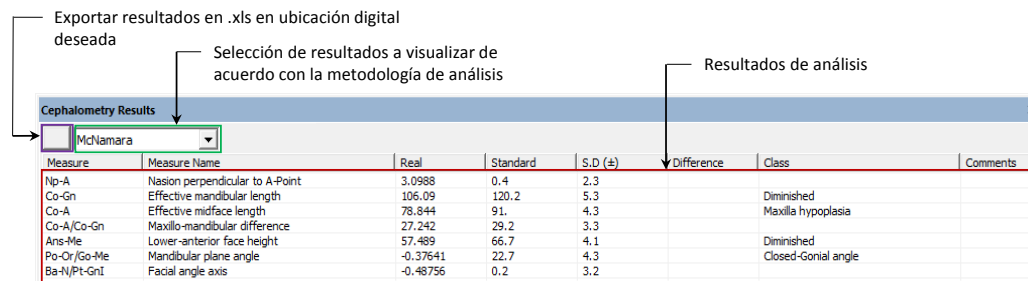
Figura 4.8 Interfaz gráfica del módulo de análisis cefalométrico: a) menú *Cephalometry* del menú principal de herramientas, b) panel de herramientas, c) ventana de calibración de radiografía, d) ventana de selección de análisis cefalométrico a efectuar, y e) panel



(c)



(d)



(e)

Figura 4.8. Interfaz gráfica del módulo de análisis cefalométrico: a) menú Cephalometry del menú principal de herramientas, b) panel de herramientas, c) ventana de calibración de radiografía, d) ventana de selección de análisis cefalométrico a efectuar, y e) panel de resultados, (continuación).

Las principales características del módulo de cefalometría se enlistan a continuación.

- Integra las metodologías de análisis empleadas internacionalmente en la planeación de cirugía ortognática y dos metodologías de análisis específicas para la población latina (Trujillo y Fonseca)
- La radiografía digital puede importarse en formato de imagen común (bmp, jpg o png).
- Los puntos anatómicos pueden definirse usando el ratón de computadora o el dispositivo háptico.
- Cálculo automático de las relaciones óseas a partir de los puntos cefalométricos.
- Generación automática del diagnóstico clínico.
- Generación automática del informe de resultados cefalométricos.

El módulo de cefalometría que se integra en la plataforma virtual-háptica OSSys se diseñó con la capacidad de generar el diagnóstico cefalométrico de forma automática a partir de los resultados obtenidos del análisis del paciente. Esta característica y funcionalidad se logró al integrar una base de datos que contiene un diagnóstico para cada norma cefalométrica integrada en el módulo de cefalometría. El diagnóstico se basa en el estudio de literatura médica referente a cirugía ortognática y diagnóstico cefalométrico. El proceso de diagnóstico virtual se genera de forma virtual tras comparar el perfil cefalométrico resultante del paciente con su norma correspondiente. Tras la comparación, el sistema revela si se satisface o viola el valor indicado por la norma. Posteriormente el módulo accede a la base de datos y ubica un diagnóstico de acuerdo con la relación ósea analizada y el valor obtenido. Para el caso que el valor de la relación ósea comparada no cumpla con el valor que indica la norma, el módulo despliega el diagnóstico médico en el panel de resultados. Simultáneamente se genera automáticamente el diagnóstico cefalométrico en formato xls. El informe contiene los resultados y diagnóstico

para cada metodología cefalométrica efectuada. La Figura 4.9 muestra el reporte de resultados y diagnóstico creado por el módulo de cefalometría.

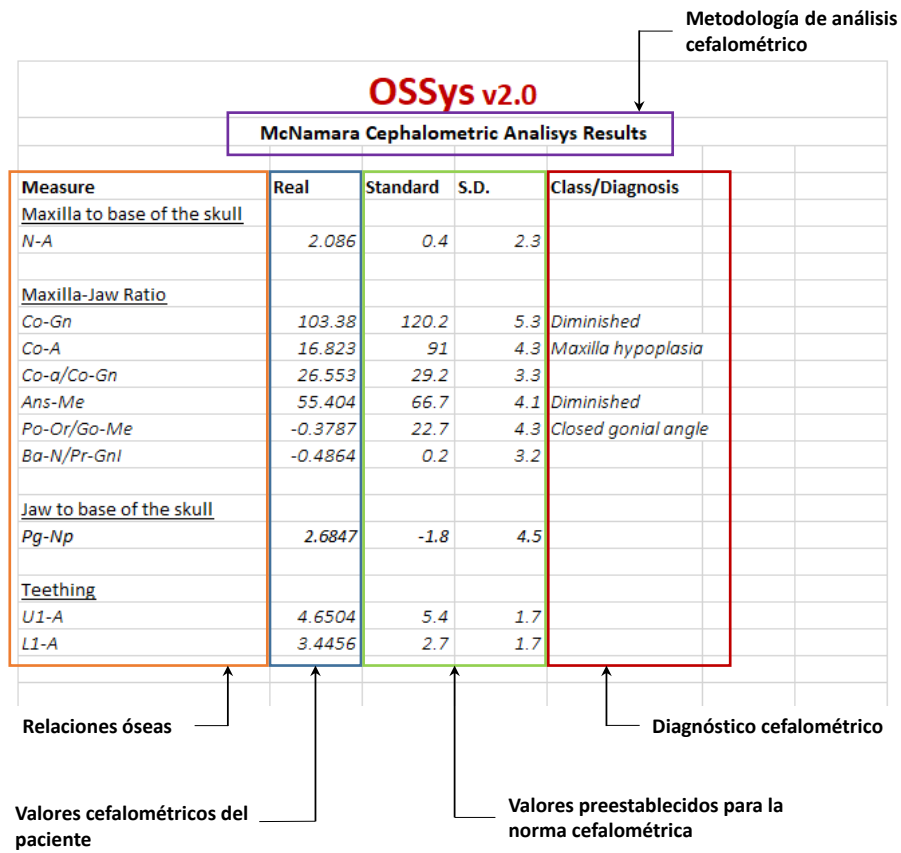


Figura 4.9 Informe de resultados y diagnóstico cefalométrico generado por el módulo de cefalometría de la plataforma OSSys.

### 4.3 Evaluación del módulo de cefalometría

El desarrollo de un sistema virtual en el área médica involucra la evaluación de su funcionalidad y desempeño respecto a los métodos tradicionales. La funcionalidad y desempeño del módulo de cefalometría implementado en OSSys v2.0 fueron evaluados y comparados con el proceso de análisis cefalométrico tradicional. El proceso de evaluación de la funcionalidad y desempeño del módulo de cefalometría busca dar respuesta a las siguientes hipótesis:

1. El desempeño de un sistema de cefalometría y diagnóstico virtual es superior al desempeño del proceso tradicional.
2. La precisión del sistema de análisis cefalométrico y diagnóstico virtual permite substituir al proceso de evaluación tradicional.
3. El diagnóstico virtual asistido es una herramienta que permite reducir los posibles errores del diagnóstico tradicional.
4. El desempeño de los cirujanos novatos se mejora en comparación con los cirujanos expertos.

Partiendo de las hipótesis anteriores se definieron diversas métricas de evaluación con el propósito de cuantificar los resultados de la evaluación. La Tabla 4.1 muestra las métricas definidas para cada hipótesis.

*Tabla 4.1 Métricas de evaluación definidas para la evaluación de cada hipótesis.*

Métrica	Hipótesis			
	Desempeño general	Precisión	Reducción de errores de diagnóstico	Desempeño novatos vs. expertos
Tiempo de identificación de puntos anatómicos.	x	-	-	x
Tiempo de obtención de relaciones óseas.	x	-	-	x
Tiempo total de análisis	x	-	-	x
Relaciones óseas de acuerdo con cada metodología.	x	x		x
Diagnóstico cefalométrico	x	x	x	x

La Figura 4.10 muestra el proceso general de evaluación del módulo de cefalometría. La evaluación fue realizada por un grupo diestro de 12 cirujanos maxilofaciales: 6 médicos expertos con más de 5 años de experiencia y 6 médicos novatos con menos de 5 años de haber egresado de la especialidad en cirugía oral y maxilofacial. Se utilizó una muestra de 10 pacientes (4 hombres y 6 mujeres) de entre 20 y 35 años de edad. Cada cirujano realizó el estudio cefalométrico de cada paciente empleando las metodologías de análisis de McNamara, Steiner y Ricketts, las cuales fueron seleccionadas de forma unánime por el grupo de médicos. Los casos de estudio analizados se presentan en el Apéndice 2.

La evaluación se efectuó en dos etapas: en la primera etapa el análisis cefalométrico de cada paciente se realizó de forma tradicional, y en la segunda etapa los análisis cefalométricos se realizaron en la plataforma virtual-háptica OSSys. En la primera etapa cada médico recibió de forma física 10 radiografías para efectuar el análisis y diagnóstico de cada caso de estudio de forma tradicional. Con el objetivo de evitar la memoria de diagnóstico de los evaluadores, la segunda etapa de evaluación se realizó 6 meses después. En esta segunda etapa los médicos fueron provistos de 10 radiografías en formato digital para su análisis y diagnóstico en la plataforma virtual-háptica OSSys. Cada médico fue entrenado durante 8 horas en el uso del módulo de cefalometría. Las fases del entrenamiento tomaron en cuenta el proceso de importación de la radiografía del paciente al ambiente virtual, el proceso de calibración de la radiografía, la selección de las metodologías de análisis cefalométrico, el proceso de selección de puntos cefalométricos, así como el despliegue de resultados y diagnóstico cefalométrico.

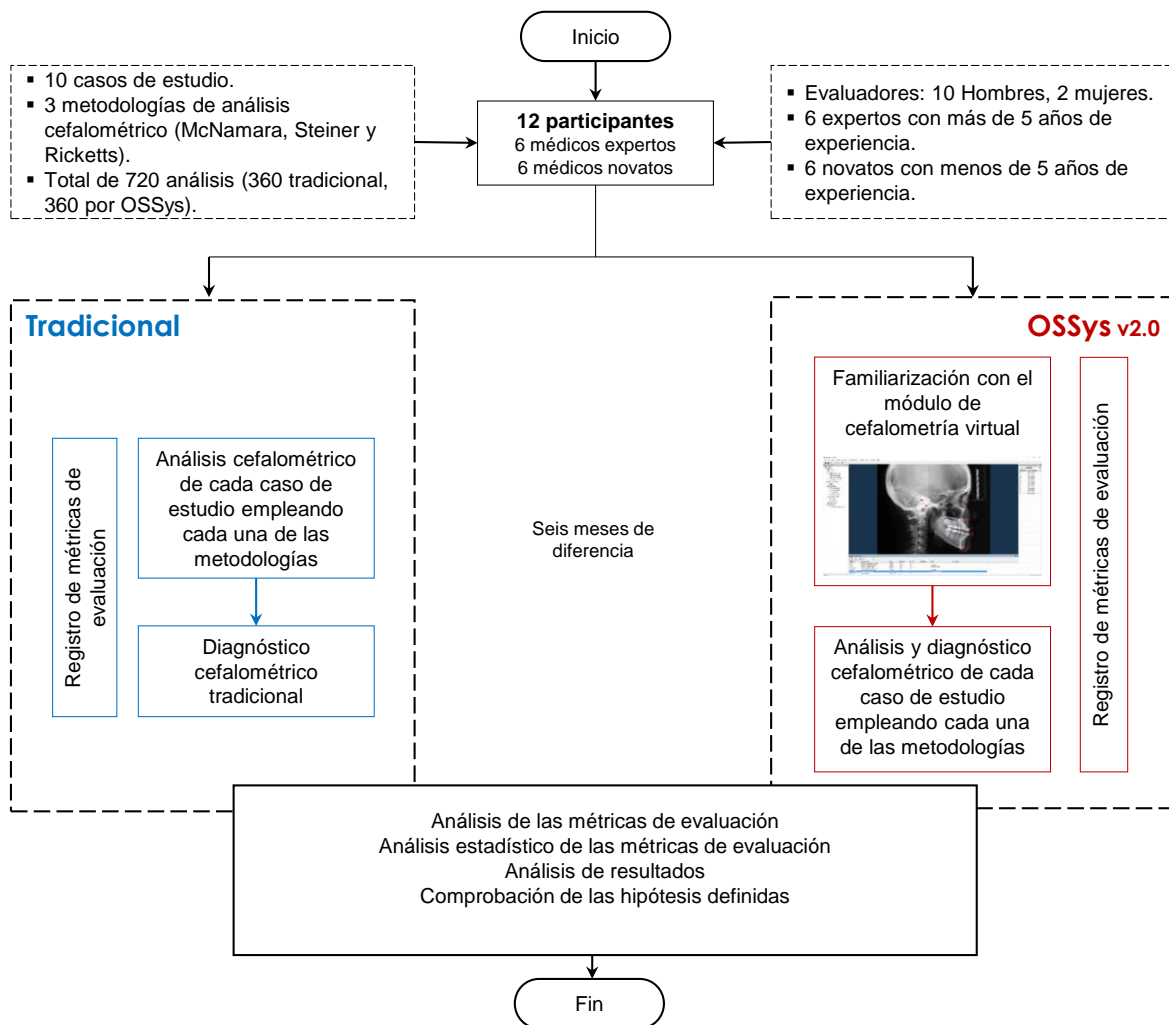


Figura 4.10 Proceso general de evaluación del módulo de cefalometría virtual integrado en OSSys v2.0.

### 4.3.1 Resultados

Los resultados obtenidos de ambas etapas del proceso de evaluación se presentan a continuación para cada una de las hipótesis preestablecidas.

#### *Desempeño del sistema de cefalometría virtual*

El desempeño del sistema de cefalometría virtual se determinó empleando las métricas que indican el tiempo de identificación de puntos anatómicos sobre la radiografía del paciente y el tiempo de cálculo de las relaciones óseas que establece cada metodología de análisis cefalométrico. Las medias de tiempo para novatos y expertos empleando las metodologías de análisis cefalométrico mediante el proceso tradicional de análisis y el método virtual se muestran en la Tabla 4.2.



Tabla 4.2 Tiempo de análisis para novatos y expertos empleando la metodología de análisis cefalométrico de McNamara, Steiner y Ricketts mediante el proceso tradicional y el método virtual.

	McNamara				Steiner				Ricketts			
	Tradicional		Virtual		Tradicional		Virtual		Tradicional		Virtual	
	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E	N	E
Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min)	13	8.1	4.5	3.9	16.9	19.3	7.3	6.8	42.5	29.3	10.3	9.8
Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min)	42.8	31.8	0	0	33	24	0	0	53	38.7	0	0
Tiempo total de análisis (min)	55.8	39.9	4.5	3.9	49.9	45.3	7.3	6.8	95.5	68	10.3	9.8
Puntos cefalométricos requeridos	13				11				29			
Relaciones óseas requeridas	10				21				29			

N: novatos; E: expertos, min: minutos.

A partir de los resultados del tiempo total de análisis es posible observar que el tiempo requerido para completar un análisis cefalométrico en el sistema virtual es mucho menor que el tiempo requerido empleando el proceso de análisis tradicional. El tiempo total de análisis en el sistema virtual varía desde un 10% hasta un 15% del tiempo requerido en el método tradicional, lo cual representa una reducción de tiempo de 90% hasta 85%. De esta manera se demuestra que el desempeño del análisis cefalométrico en el sistema virtual es mayor que en el método tradicional.

### ***Precisión del sistema de análisis cefalométrico y diagnóstico virtual***

Dentro del proceso de evaluación del módulo virtual de cefalometría se obtuvieron los valores medios de cada relación ósea establecida por las metodologías de análisis cefalométricos. Los valores medios obtenidos fueron calculados conjuntando los resultados de cada médico discriminando entre el proceso real y virtual de análisis. Los valores medios de cada caso de estudio se presentan en el Apéndice 3. Con el propósito evaluar la precisión del módulo de análisis cefalométrico virtual en comparación con el método tradicional, se realizó la prueba t de student que permite comparar las medias de dos poblaciones e identificar si existen diferencias significativas entre ellas. La prueba estadística t de student es útil para analizar los resultados obtenidos por dos métodos distintos e identificar la probabilidad (*valor-p*) existente de que sus medias seas iguales a partir del establecimiento de la hipótesis nula ( $H_0$ ) y el valor de significancia ( $\alpha$ ).

Primeramente, se procedió a analizar los resultados obtenidos por los cirujanos expertos usando el proceso virtual y el proceso tradicional de cefalometría. Este análisis permite validar los resultados obtenidos por los expertos mediante dos herramientas distintas (el método virtual y el método tradicional). Además, permite identificar si los resultados obtenidos mediante el uso del módulo de cefalometría virtual difieren del proceso tradicional de cefalometría. De esta manera, la hipótesis nula ( $H_0$ ) establecida considera que “La media obtenida para cada relación ósea por el método tradicional por expertos ( $\mu_{Exp-Trad}$ ) es igual o no difiere significativamente de la media de las relaciones óseas obtenidas por expertos empleando el proceso virtual de análisis ( $\mu_{Exp-Virt}$ )”.

$$H_0 : \mu_{Exp-Trad} = \mu_{Exp-Virt} \quad (4.7)$$

La hipótesis nula fue evaluada con un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ) empleando la herramienta de análisis de datos para la prueba t de student de Microsoft Excel®. Como resultado se obtiene el valor-p el cual indica la probabilidad de que la hipótesis nula se cumpla. El valor-p es comparado con el nivel de significancia establecido, donde si el valor-p resulta mayor al nivel de significancia se considera la hipótesis nula aceptada.

$$\text{valor} - p \geq \alpha, H_0 : \text{Aceptada} \quad (4.8)$$

Los resultados de estos análisis para las metodologías McNamara, Steiner y Ricketts, se presentan en las Figura 4.11, Figura 4.12 y Figura 4.13, respectivamente, y en el Apéndice 3.

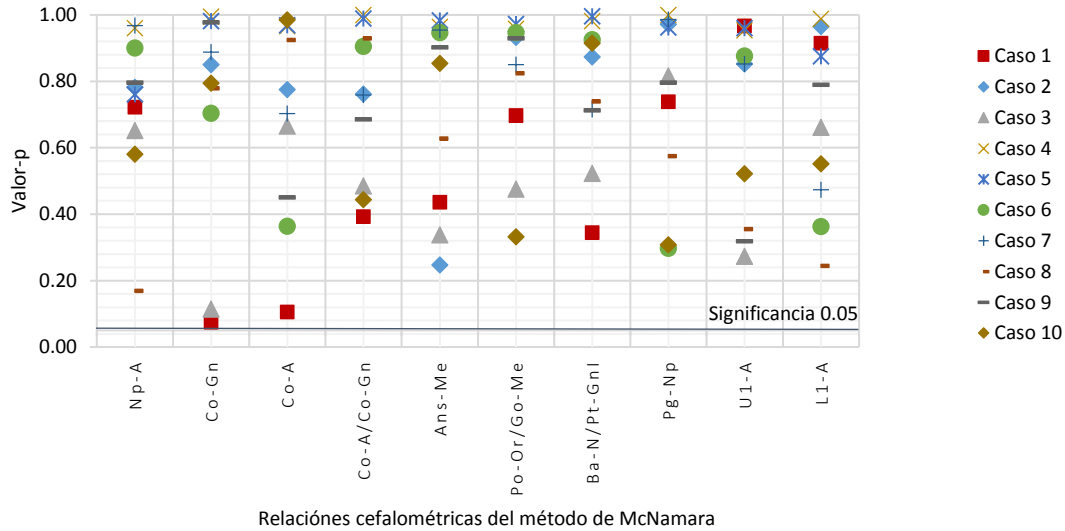


Figura 4.11 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de McNamara (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0).

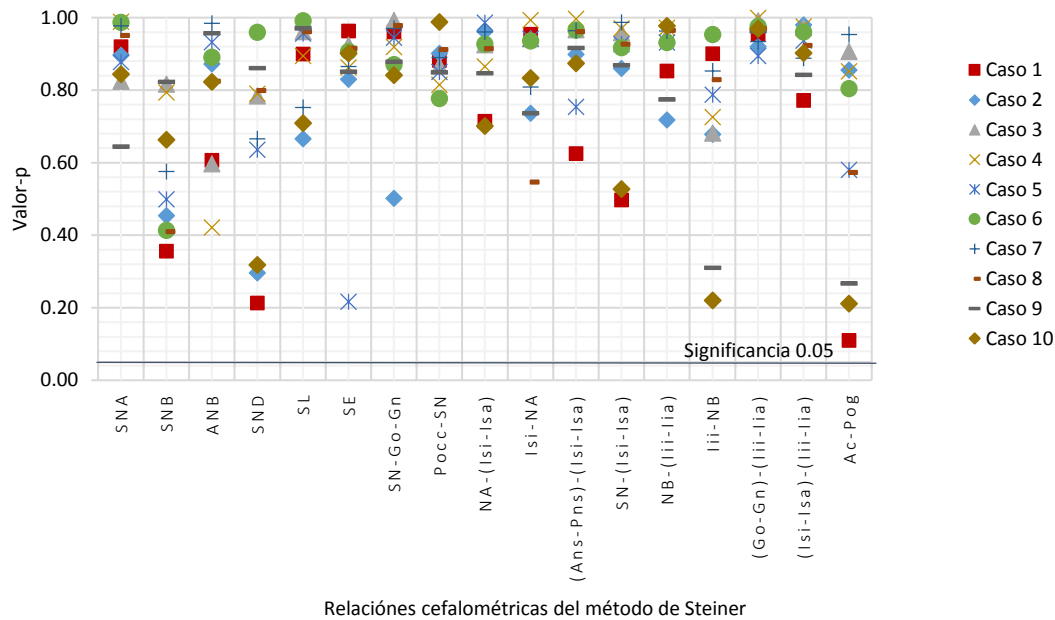


Figura 4.12 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de Steiner (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0).

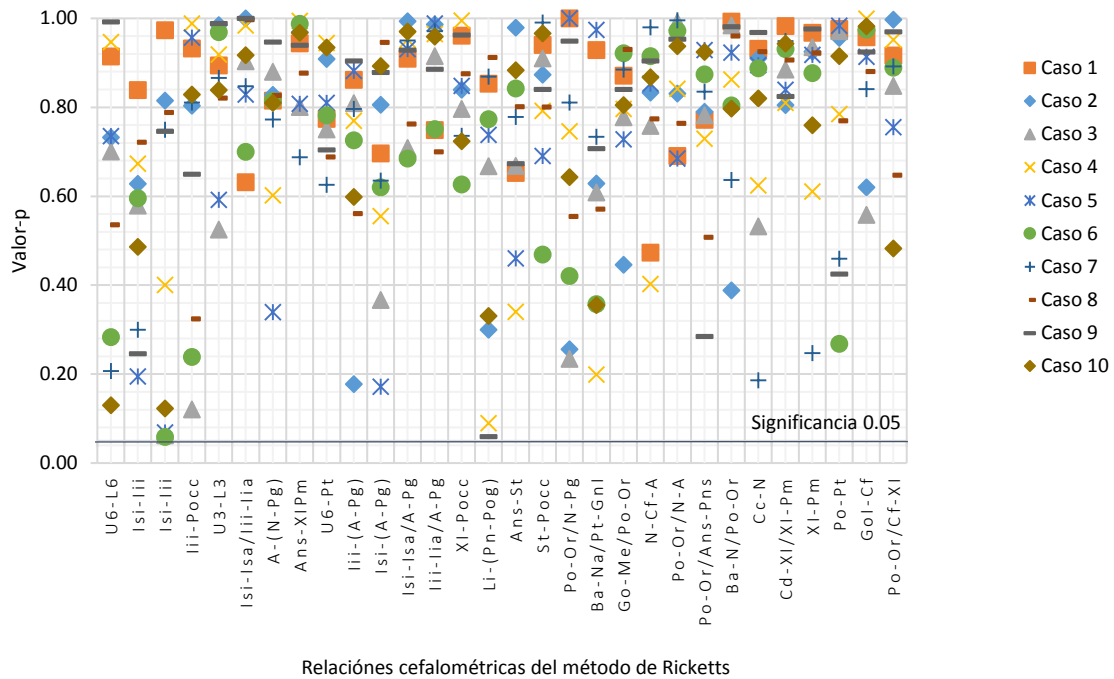


Figura 4.13 Resultados de prueba t-student para expertos empleando la metodología de análisis de Ricketts (comparativa entre medias del proceso de evaluación tradicional vs el proceso virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys v2.0).

### Desempeño de cirujanos novatos

Posterior al análisis de los resultados obtenidos por expertos empleando dos procesos de análisis, se procedió a evaluar los resultados cefalométricos generados entre novatos y expertos empleando el proceso de análisis tradicional. Esta evaluación permite conocer si existe una diferencia significativa entre ambos grupos de evaluadores. Para efectuar este análisis se define la hipótesis nula como: “La media obtenida por los novatos ( $\mu_{Nov-Trad}$ ) para cada relación ósea y usando el método tradicional es igual o no difiere significativamente de la media obtenida por los expertos ( $\mu_{Exp-Trad}$ ) para cada relación ósea empleando el método tradicional”.

$$H_0 : \mu_{Nov-Trad} = \mu_{Exp-Trad} \quad (4.9)$$

Para evaluar la hipótesis nula establecida se emplea la prueba t de student con un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Los resultados para cada relación ósea y las metodologías McNamara, Steiner y Ricketts se muestran en la Figura 4.14, Figura 4.15 y Figura 4.16, respectivamente, resumiéndose en el Apéndice 3 para cada caso de estudio.

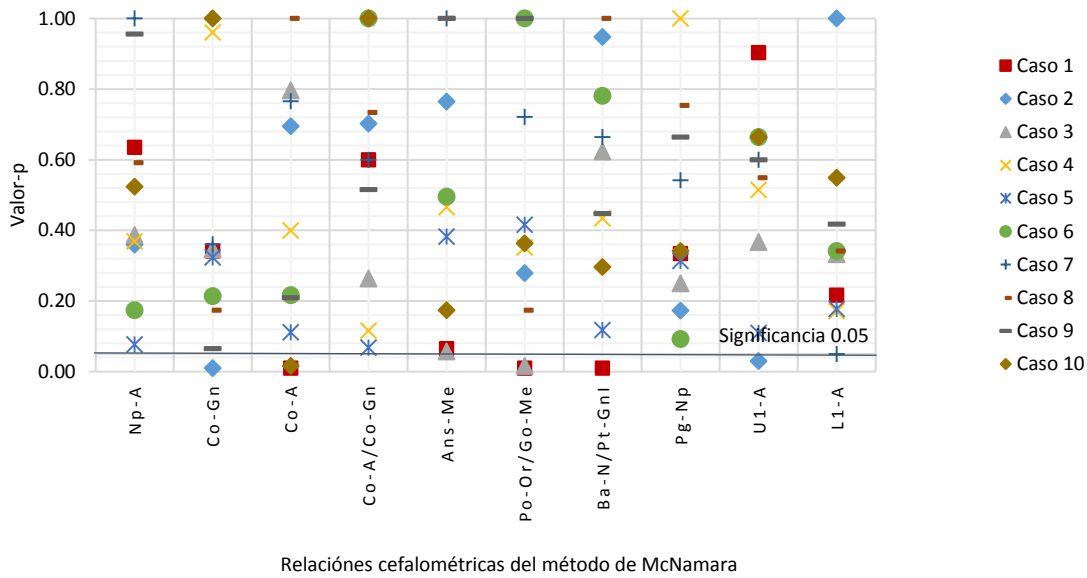


Figura 4.14 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de McNamara y el proceso tradicional de cefalometría.

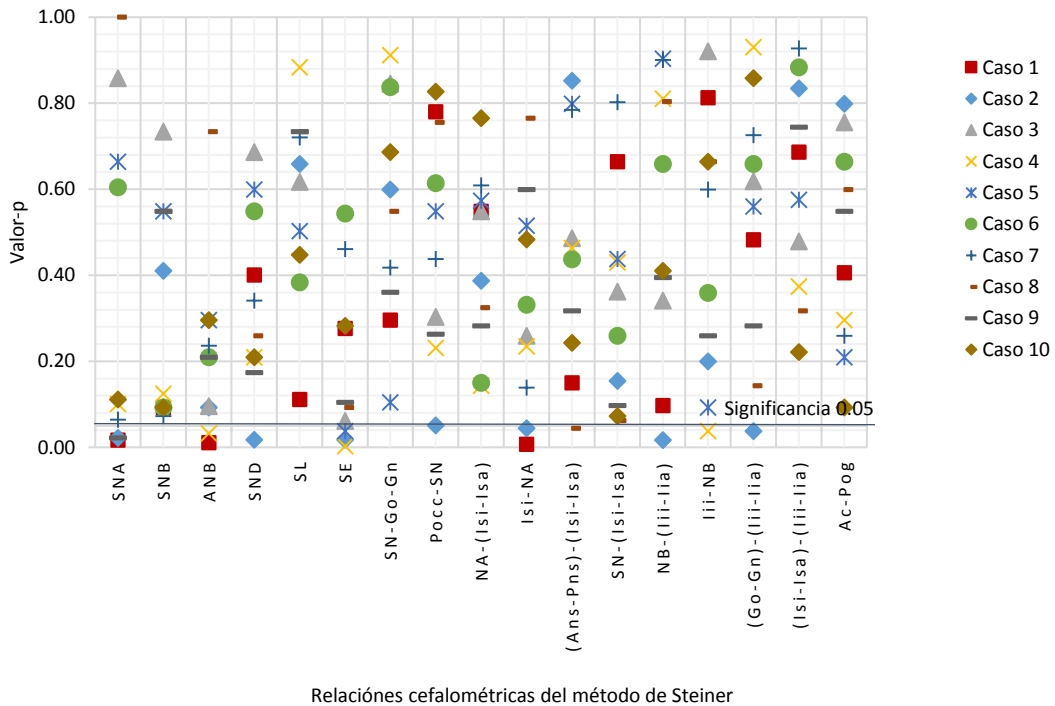


Figura 4.15 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso tradicional de cefalometría.

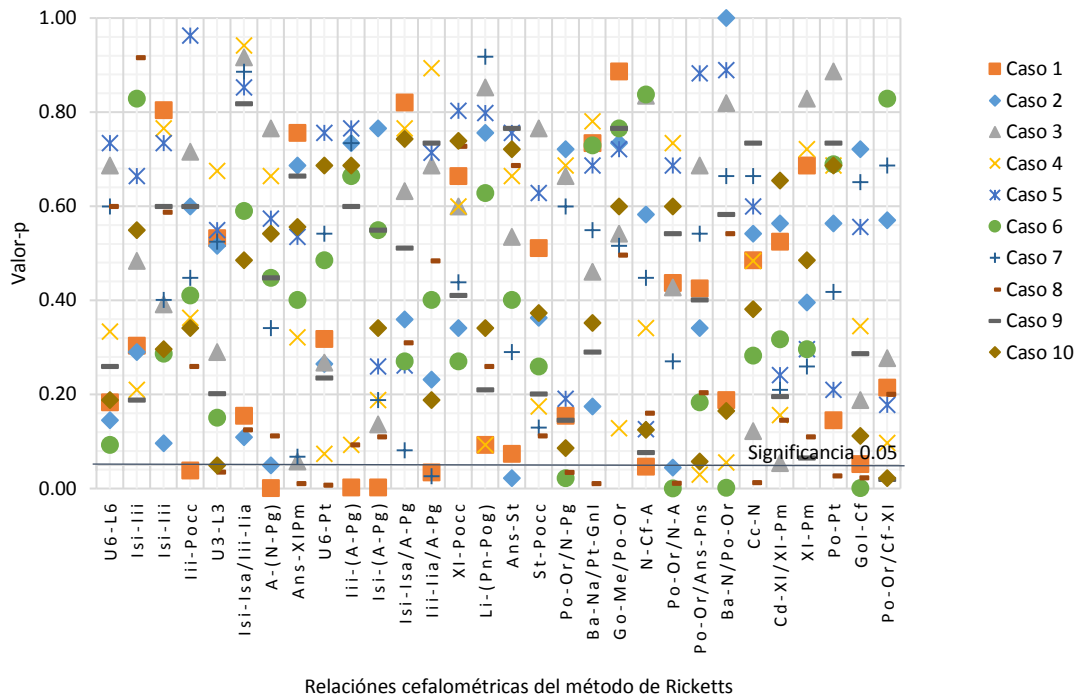


Figura 4.16 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso tradicional de cefalometría.

Habiendo evaluado los resultados obtenidos entre médicos novatos y expertos empleando el proceso tradicional, se efectúa la comparativa entre estos dos grupos de participantes, pero ahora empleando el módulo de cefalometría virtual de OSSys v2.0. Este análisis comparativo permitirá identificar si el sistema de cefalometría virtual permite a los médicos novatos lograr resultados similares a los obtenidos por médicos experto. Para efectuar el análisis se define la hipótesis de la siguiente manera: “La media obtenida por los novatos ( $\mu_{Nov-Virt}$ ) para cada relación ósea y usando el método virtual es igual o no difiere significativamente de la media de las relaciones óseas obtenidas por los expertos empleando el proceso virtual de análisis ( $\mu_{Exp-Virt}$ )”.

$$H_0 : \mu_{Nov-Virt} = \mu_{Exp-Virt} \quad (4.10)$$

La evaluación de la hipótesis nula se efectuó empleando la prueba estadística t de student integrada en la herramienta de análisis de datos de Microsoft Excel®. El análisis considera un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ). Los resultados para las metodologías McNamara, Steiner y Ricketts se muestran en la Figura 4.17, Figura 4.18 y Figura 4.19, respectivamente, y en el Apéndice 3.

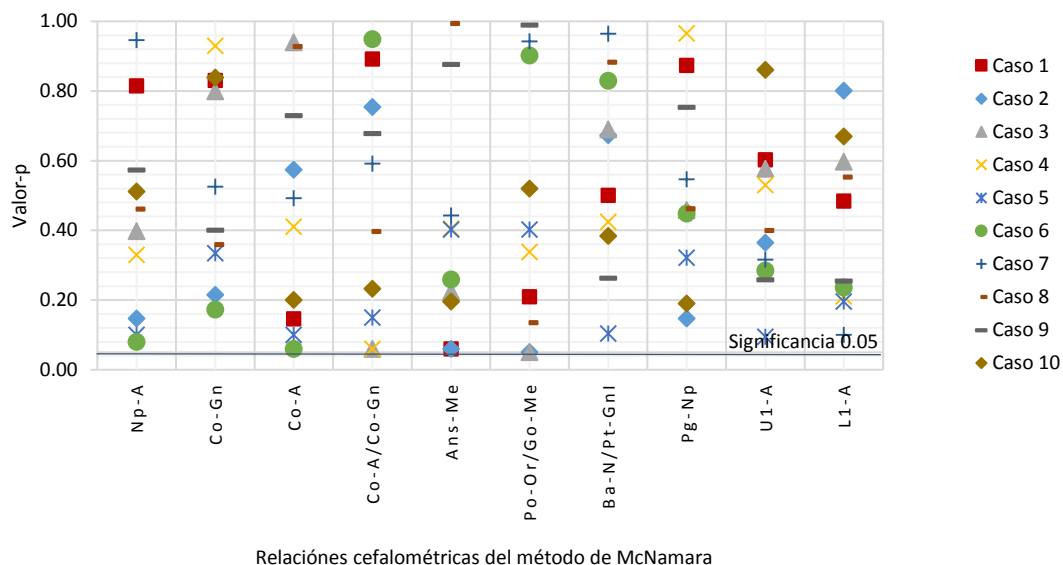


Figura 4.17 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de McNamara y el proceso virtual de cefalometría.

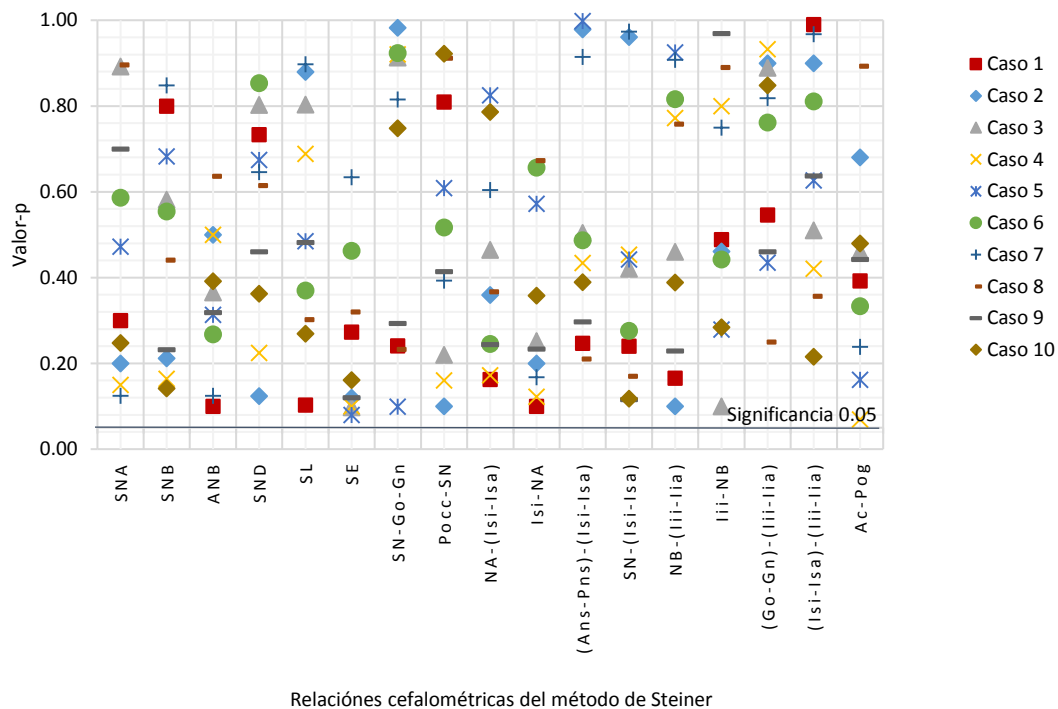


Figura 4.18 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Steiner y el proceso virtual de cefalometría.

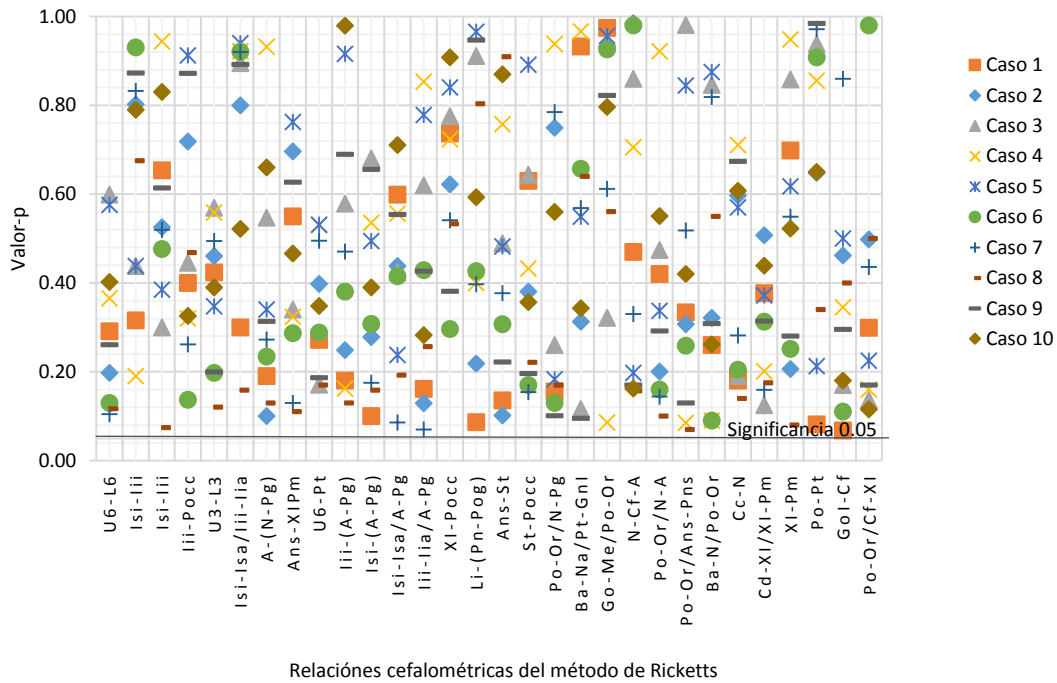


Figura 4.19 Resultados de prueba t-student para novatos y expertos empleando la metodología de análisis de Ricketts y el proceso virtual de cefalometría.

**Diagnóstico virtual como herramienta para reducir errores del diagnóstico tradicional**

Con el objetivo de validar la herramienta de diagnóstico asistido que integra el módulo de cefalometría, cada cirujano participante registró su diagnóstico para de cada caso de estudio analizado y cada metodología de análisis cefalométrico utilizada. Primeramente, los resultados de diagnóstico definidos por el grupo de médicos expertos de forma tradicional fueron analizados con el objetivo de identificar discrepancias y generar un diagnóstico de referencia para cada caso de estudio, el diagnóstico de referencia para cada caso de estudio se muestra en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Diagnóstico de referencia generado por médicos expertos de forma tradicional para cada caso de estudio.

Caso de estudio	McNamara	Steiner	Ricketts
1	P.F: Convexo R.M: Clase II V.A: Reducida T.R: BSSO	P.F: Convexo R.M: Clase II T.R: BSSO	P.F: Convexo R.M: Clase II T.R: BSSO
2	P.F: Concavo R.M: Clase III V.A: Reducida T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar
3	P.F: Convexo R.M: Clase I V.A: Reducida T.R: BSSO	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: BSSO	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: BSSO

P.F: perfil facial, R.M: relación molar, V.A vía aérea. T.R: tratamiento quirúrgico recomendado, BSSO: osteotomía de rama sagital.

Tabla 4.3 Diagnóstico de referencia generado por médicos expertos de forma tradicional para cada caso de estudio, (continuación).

Caso de estudio	McNamara	Steiner	Ricketts
4	P.F: Convexo R.M: Clase I V.A: Normal T.R: LeFort I	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: LeFort I	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: LeFort I
5	P.F: Cóncavo R.M: Clase III V.A: Reducida T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar
6	P.F: Cóncavo R.M: Clase III V.A: Reducida T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar
7	P.F: Cóncavo R.M: Clase III V.A: Normal T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar
8	P.F: Convexo R.M: Clase I V.A: Normal T.R: LeFort I	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: LeFort I	P.F: Convexo R.M: Clase I T.R: LeFort I
9	P.F: Convexo R.M: Clase III V.A: Normal T.R: Bimaxilar	P.F: Convexo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar	P.F: Convexo R.M: Clase III T.R: Bimaxilar
10	P.F: Cóncavo R.M: Clase III V.A: Reducida T.R: BSSO	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: BSSO	P.F: Cóncavo R.M: Clase III T.R: BSSO

P.F: perfil facial, R.M: relación molar, V.A vía aérea. T.R: tratamiento quirúrgico recomendado, BSSO: osteotomía de rama sagital.

Partiendo del diagnóstico de referencia generado por el grupo de médicos expertos, se evaluó el diagnóstico generado por los médicos novatos empleando un operador lógico. El operador lógico considera un valor de 1 al diagnóstico que coincide con la referencia y un valor de 0 al diagnóstico distinto a la referencia establecida. Para obtener el nivel de coincidencia  $N_C$  entre diagnósticos se calculó el porcentaje de asertividad empleando la Ec. 4.10, donde  $\sum D_C$  corresponde a la sumatoria de diagnósticos que coinciden con la referencia establecida y  $N_{Diag}$  al número total de diagnósticos. Los resultados de diagnóstico se muestran en la Tabla 4.4.

$$N_C(\%) = \frac{\sum D_C}{N_{Diag}} \times 100 \quad (4.10)$$

Tabla 4.4 Porcentaje de coincidencia en el diagnóstico cefalométrico tomando como referencia el diagnóstico tradicional generado por expertos.



Metodología de análisis cefalométrico	Tradicional		Virtual	
	Novatos (%)	Expertos (%)	Novatos (%)	Expertos (%)
McNamara	84%	100%	100%	100%
Steiner	94%	100%	99%	100%
Ricketts	92%	100%	99%	100%
Promedio	90%	100%	99.3%	100%

#### 4.3.2 Discusión de resultados

A partir de los resultados obtenidos del proceso de evaluación del módulo de cefalometría virtual, es posible valorar su funcionalidad, desempeño e impacto con respecto al proceso tradicional.

##### *Desempeño del sistema de cefalometría virtual vs desempeño del proceso tradicional*

A partir de los resultados obtenidos se identifica que en promedio un médico novato requiere 1.3 minutos para identificar un punto cefalométrico de forma tradicional, en contraste con un médico experimentado el cual invierte en promedio 1.06 minutos. Esta diferencia entre novatos y expertos radica en la habilidad que presenta el médico experto en la identificación de puntos anatómicos. Sin embargo, la diferencia en tiempo entre ambos grupos no excede el 30% empleándose el proceso tradicional de cefalometría. Tras el uso del módulo de cefalometría virtual el tiempo promedio de un médico novato para la identificación de un punto anatómico es de 0.4 minutos contra 0.38 minutos de un médico experto. La reducción de tiempo en la identificación de puntos cefalométricos empleando el proceso de análisis virtual es posible ya que se utiliza una radiografía en formato digital, por lo que el tiempo depende exclusivamente de la habilidad del médico para la identificación de puntos cefalométricos, permitiendo a médicos novatos y expertos igualar su desempeño.

Además, se observa que la mayor inversión de tiempo que realiza el médico en el proceso de cefalometría tradicional radica en el cálculo de las relaciones óseas. A diferencia del proceso de cefalometría tradicional, el análisis cefalométrico virtual no requiere que el médico efectúe el proceso de cálculo de las relaciones óseas ya que el módulo de cefalometría virtual realiza el cálculo de forma automática una vez identificados todos los puntos cefalométricos. Este cálculo automatizado se traduce en una reducción del tiempo total del proceso de análisis. De acuerdo con los resultados obtenidos, el módulo de cefalometría virtual permite reducir el tiempo total de análisis hasta en un 90% en comparación con el proceso tradicional. Además, el método virtual permite a los cirujanos novatos aproximarse al tiempo requerido por los cirujanos expertos para la realización del análisis cefalométrico.

De esta manera se puede decir que los resultados obtenidos evidencian que el uso de un sistema de análisis cefalométrico asistido por computadora es más eficiente que el proceso de análisis cefalométrico tradicional. Por lo tanto, se valida la hipótesis de investigación definida en el proceso de evaluación del módulo de cefalometría virtual.

##### *Precisión del sistema de análisis cefalométrico y diagnóstico virtual*

De los resultados obtenidos por el grupo de cirujanos participantes se observa que no existe una diferencia significativa en los valores de las relaciones óseas obtenidas por los cirujanos expertos utilizando el método tradicional y el método virtual. Esta afirmación se corrobora con los resultados de la prueba estadística t de student, los cuales satisfacen la hipótesis nula al obtener un valor-p mayor al nivel de significancia empleado para todas las relaciones óseas obtenidas por expertos utilizando ambos métodos. De esta manera se valida al módulo de cefalometría virtual como sustituto del proceso de cefalometría tradicional.

### ***Desempeño de cirujanos novatos vs cirujanos expertos***

Los resultados cefalométricos obtenidos entre novatos y expertos empleando el proceso tradicional de análisis cefalométrico revelan una diferencia entre estos dos grupos de participantes. Esta diferencia evidencia la necesidad de reducir la curva de aprendizaje del médico novato y la generación de herramientas que le permitan generar un mejor resultado en el análisis cefalométrico. Al comparar los resultados obtenidos entre médicos novatos y expertos empleando el módulo de cefalometría virtual de OSSys, se observa una mejora en los resultados cefalométricos obtenidos por parte de los cirujanos novatos. En las Figuras 4.15 a 4.17 se muestran los valores de la prueba t de student obtenidos tras comparar los resultados cefalométricos de forma virtual entre novatos y expertos. De estas figuras se puede apreciar de que a pesar de existir una amplia dispersión entre los valores p, se satisface en su totalidad la hipótesis nula definida para la prueba. Por lo tanto, se valida la hipótesis de investigación estableciendo que el módulo de cefalometría virtual propuesto e implementado en OSSys puede llegar a sustituir el proceso de cefalometría tradicional en la práctica médica real. Además, permite a médicos novatos aproximar la precisión de sus resultados cefalométricos con respecto a los resultados obtenidos por cirujanos expertos.

### ***Diagnóstico virtual como herramienta para reducir errores del diagnóstico tradicional***

Tras evaluar el diagnóstico de los médicos expertos de forma tradicional y haber encontrado el 100% de coincidencias para los casos de estudio analizados, se procedió a examinar los resultados de diagnóstico obtenidos por el grupo de novatos. El análisis del diagnóstico realizado por novatos de forma tradicional fue comparado contra el diagnóstico de expertos empleando un operador lógico para indicar su asertividad o error. De acuerdo con los resultados del análisis, en promedio el 90% del diagnóstico dictaminado por médicos novatos coincide con el diagnóstico de médicos expertos empleando el proceso tradicional. Por otro lado, analizando los resultados de los diagnósticos obtenidos por médicos novatos empleando el módulo de análisis cefalométrico virtual se observa una coincidencia promedio del 99.3%. Por lo cual se valida la hipótesis de investigación, la cual hace referencia a que el diagnóstico virtual asistido por computadora permite reducir posibles errores del diagnóstico efectuado de forma tradicional.

#### **4.3.3 Discusión general**

Tras el análisis de resultados de la evaluación del módulo de cefalometría virtual se comprueba su capacidad de ser empleado como sustituto del proceso de cefalometría tradicional. Las ventajas implícitas en el uso del módulo de cefalometría son: la capacidad de incrementar el desempeño del proceso de cefalometría tradicional al reducir el tiempo requerido por el médico para efectuar el análisis cefalométrico, brindar una precisión de resultados de análisis cefalométrico comparable sin diferencias significativas al proceso tradicional, y reducir errores de diagnóstico.

La reducción del tiempo de análisis se debe a que el proceso de cefalometría asistida no requiere que el cirujano efectúe el cálculo de las relaciones óseas establecidas en las distintas metodologías de análisis cefalométrico integradas. Además, se comprueba que el módulo de cefalometría asistida permite a los médicos novatos mejorar la precisión de sus resultados de análisis cefalométrico, y reducir errores de diagnóstico.

Por lo anterior, el módulo de cefalometría virtual asistida propuesto cumple con los requerimientos para su posible integración en la práctica médica real.

## Capítulo 5. Cirugía virtual de modelos y generación de plantillas quirúrgicas

En este capítulo se presenta el desarrollo de los módulos que permiten efectuar la cirugía de modelos y la generación de la plantilla quirúrgica de forma virtual. Los módulos se han desarrollado e integrado en la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

### 5.1 Cirugía virtual de modelos

En el proceso de planeación de cirugía ortognática, la etapa de cirugía de modelos comprende simular y determinar el desplazamiento maxilar necesario en pacientes que requieren la corrección de una deformidad dentofacial [219]. Tradicionalmente, el proceso de cirugía de modelos comienza con la adquisición de modelos dentales de yeso directamente del paciente. Los modelos de yeso duplican la anatomía de las arcadas dentales, y son montados en un articulador dental que permite simular la maloclusión del paciente. Posteriormente, se señalan sobre los modelos, líneas de referencia para cuantificar el desplazamiento de los modelos. A partir de las líneas de referencia, los modelos son seccionados empleando herramientas de corte de uso común como sierras. Los segmentos resultantes del seccionado se reposicionan sobre el articulador dental hasta obtener la oclusión idónea, la cual simula la corrección del problema de desalineación maxilar. Una vez reposicionadas las secciones del modelo, el médico cuantifica el desplazamiento y/o rotación que sufrió cada arcada dental. El desplazamiento es registrado en una férula o plantilla quirúrgica, la cual se genera sobre los modelos de yeso reposicionados, y sirve como guía quirúrgica en la cirugía real [3, 166].

#### 5.1.1 Procedimiento general

Dentro de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 se ha desarrollado e implementado el módulo de cirugía de modelos, el cual incluye herramientas que permiten efectuar en un ambiente virtual-háptico el segmentado y reposicionamiento maxilar sobre el modelo 3D del paciente. El proceso general de cirugía virtual de modelos se muestra en la Figura 5.1.

El procedimiento comienza al desplegar el panel del módulo de cirugía de modelos e importar el modelo 3D del paciente en formato OBJ o STL. Mediante los comandos de la librería gráfica VTK [211] implementados en el módulo gráfico de OSSys v2.0, el modelo 3D del paciente es renderizado en el ambiente virtual y mostrado en la escena gráfica, Figura 5.2. A partir del modelo del paciente renderizado en la escena virtual de OSSys, el médico procede a definir el proceso quirúrgico de corrección maxilar auxiliándose de los resultados y diagnóstico cefalométrico previamente obtenido. El médico despliega la ventana de selección de procedimiento ortognático a simular y define los tipos de fractura ortognática que permitirán corregir el problema de desalineación maxilar. Cada tipo de procedimiento ortognático se encuentra definido por una fractura ósea, la cual es representada en la plataforma virtual-háptica OSSys empleando un plano de corte. Para cada plano de corte existen tres puntos anatómicos que el médico define sobre el modelo del paciente empleando el dispositivo háptico. Los puntos requeridos para cada procedimiento ortognático se muestran en la Tabla 5.1. Los procedimientos ortognáticos se encuentran definidos por el tipo de fractura ósea a generar e incluyen: la reposición mandibular (BSSO, osteotomía sagital bilateral), la reposición maxilar (LeFort I y LeFort II) y la reposición de mentón (Genioplastia). De acuerdo al procedimiento ortognático seleccionado, el modelo tridimensional del paciente se divide en secciones virtualmente independientes del modelo inicial; pudiéndose generar diversos segmentos virtuales de forma simultánea. Cada segmento virtual puede ser reposicionado en los 6 grados de libertad empleando el dispositivo háptico, el teclado o el ratón de computadora. El módulo de cirugía de modelos renderiza en tiempo real la posición de cada segmento óseo reposicionado, teniendo como referencia su posición inicial.

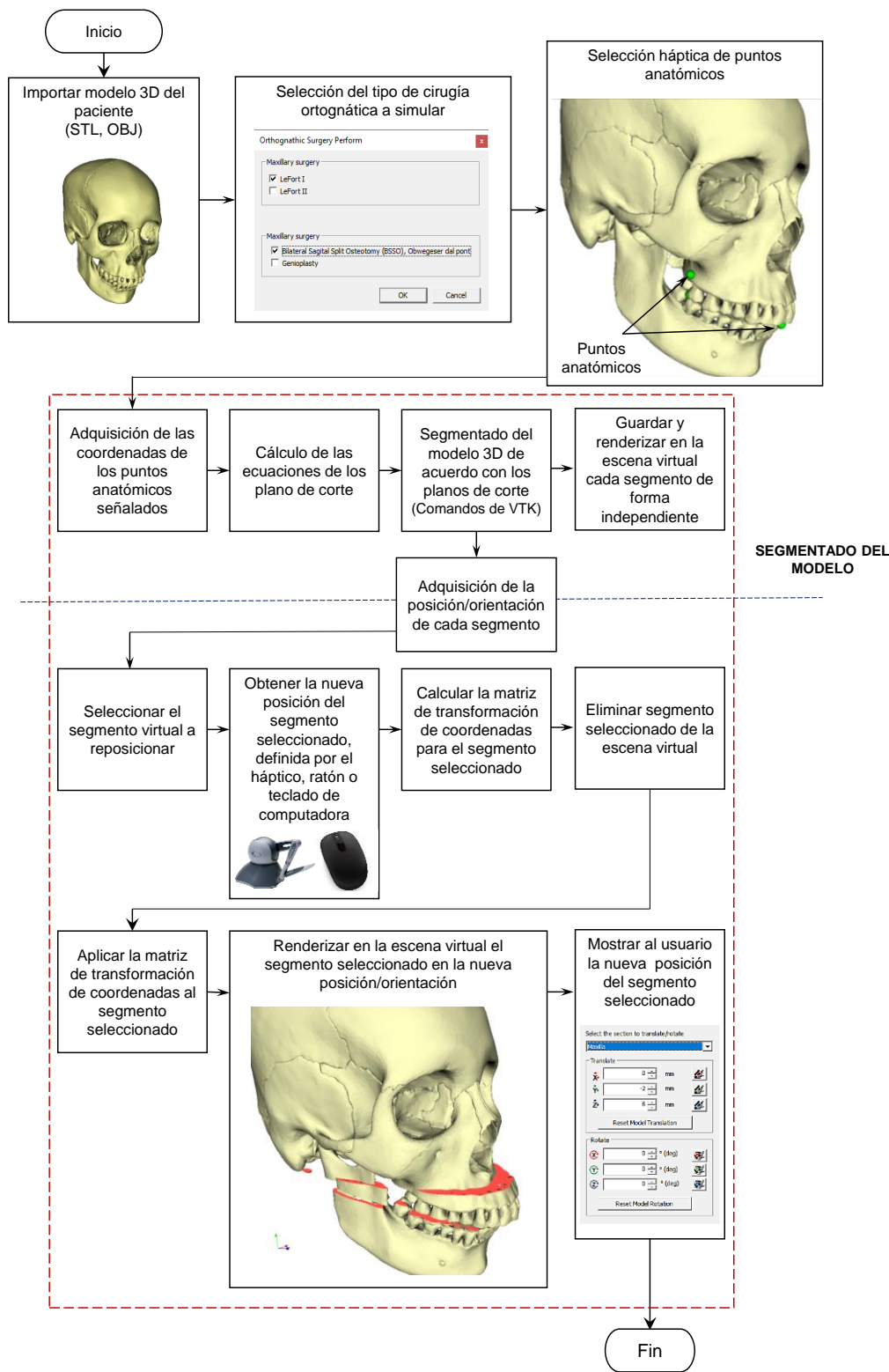


Figura 5.1 Proceso general de la cirugía virtual de modelos empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

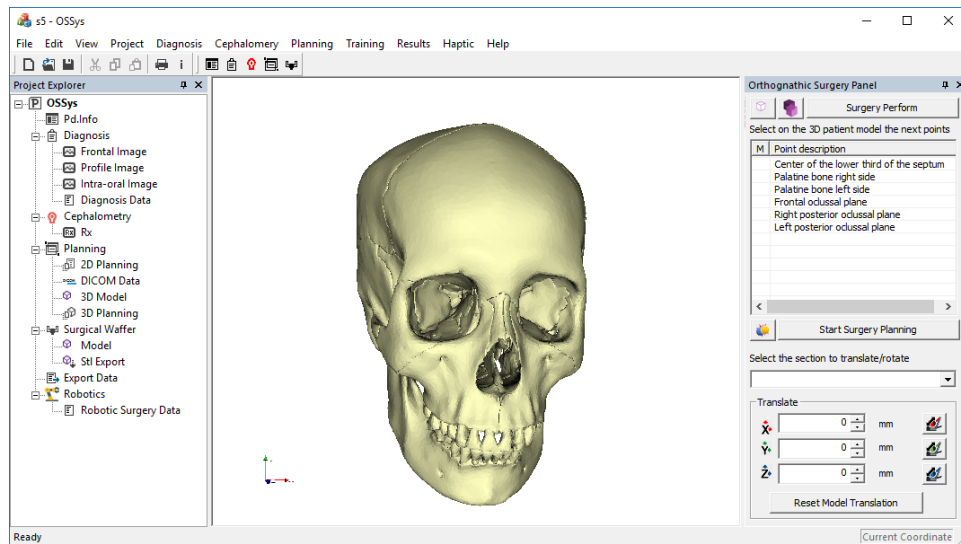


Figura 5.2 Modelo 3D del paciente renderizado en la escena virtual de la plataforma OSSys v2.0.

Tabla 5.1 Puntos anatómicos requeridos para generar el segmentado del modelo virtual de cada procedimiento ortognático.

Procedimiento	Puntos anatómicos	Descripción
Le Fort I		N: Nasión P-D: Palatino derecho P-I: Palatino izquierdo POC-D: Punto oclusal derecho POC-I: Punto oclusal izquierdo POC-F: Punto oclusal frontal Sn: Subnasal
Le Fort II		Ri: Raíz incisal central MF-D: Debajo del foramen mentoniano, derecho MF-I: Debajo del foramen mentoniano izquierdo
BSSO		N: Nasión P-D: Palatino derecho P-I: Palatino izquierdo POC-D: Punto oclusal derecho POC-I: Punto oclusal izquierdo POC-F: Punto oclusal frontal Sn: Subnasal Ri: Raíz incisal central MF-D: Debajo del foramen mentoniano, derecho MF-I: Debajo del foramen mentoniano izquierdo
Genioplastia (Mentoplastía)		

### 5.1.2 Segmentado del modelo virtual

A partir de los puntos anatómicos definidos por el usuario y con ayuda del dispositivo háptico, el médico procede a ejecutar el segmentado del modelo pulsando el botón *Start Surgery Planning* del panel del módulo de cirugía de modelos. El segmentado del modelo virtual es generado de forma automática y comienza con la adquisición de las coordenadas los puntos anatómicos definidos por el usuario. Al obtener las coordenadas de cada punto anatómico indicado se obtiene la ecuación del plano formado por los tres puntos que definen la fractura facial. La ecuación del plano es generada al resolver el siguiente determinante:

$$\begin{vmatrix} x - x_1 & y - y_1 & z - z_1 \\ x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0 \quad (5.1)$$

donde  $x_1, y_1, y z_1$  son las coordenadas en  $x, y, y z$  del primer punto anatómico,  $x_2, y_2, y z_2$  las coordenadas en  $x, y, y z$  del segundo punto anatómico, y  $x_3, y_3, y z_3$  las coordenadas en  $x, y, y z$  del tercer punto anatómico.

Obteniendo la forma implícita de la ecuación del plano [220]:

$$Ax + Bx + Cz + D = 0 \quad (5.2)$$

donde  $A, B, C, D$ : son los Coeficientes de la ecuación del plano.

Mediante la ecuación implícita de cada plano de corte y la función gráfica de Solid Clip incluida en VTK e implementada en el módulo de cirugía de modelos de OSSys v2.0, se genera el segmentado del modelo 3D del paciente. Cada segmento virtual generado simula las secciones óseas fracturadas de acuerdo con los procedimientos ortognáticos seleccionados. Los segmentos virtuales generados son almacenados automáticamente en la ruta definida para el proyecto de planeación ortognática como modelos tridimensionales independientes. Para cada segmento resultante se obtiene la posición de su centro geométrico respecto al origen del modelo 3D del paciente sin segmentar. El centro geométrico respecto al origen del modelo 3D del paciente sin segmentar coincidió con el origen gráfico de la escena virtual. La posición de cada segmento se almacena en un arreglo vectorial y permitirá posicionar cada segmento generado al actualizar la escena virtual.

### 5.1.3 Reposicionamiento de segmentos virtuales

El proceso de actualización de la escena virtual incorpora el renderizado y posicionamiento de cada segmento virtual generado previamente. Cada segmento es situado en el espacio virtual de acuerdo con la posición almacenada de forma previa, mostrando el modelo 3D del paciente de cada segmento en su posición inicial. Después de renderizar los segmentos en la escena virtual mediante el módulo gráfico, se genera el modelo háptico y un modelo físico o representación virtual física de cada segmento. El modelo háptico y el modelo físico se generan por el módulo físico-háptico implementado en la plataforma virtual-háptica. El modelo háptico permite el reposicionamiento de cada segmento empleando el dispositivo háptico y, la representación virtual física brinda al sistema OSSys la capacidad de detectar colisiones entre los segmentos virtuales. La funcionalidad de detección de colisiones entre objetos puede ser desactivada por el usuario pulsando el botón de activar/desactivar detección de colisiones del panel del módulo de cirugía de modelos. Después de la generación del modelo háptico y la representación virtual física, el sistema brinda al usuario la capacidad de reposicionar y reorientar cada segmento virtual.

El reposicionamiento y reorientación de los segmentos virtuales es posible mediante el dispositivo háptico, el teclado o el ratón de computadora. La reposición y reorientación empleando el háptico es posible en los 6

grados de libertad, y se realiza ubicando el cursor háptico sobre el segmento virtual seleccionado y manteniendo presionado el botón principal del lápiz háptico. Al presionar el botón principal del dispositivo háptico, el módulo de cirugía de modelos adquiere la posición del cursor háptico a razón de 1000Hz. Si el cursor háptico se encuentra palpando el segmento virtual se genera el desplazamiento y reorientación del segmento en la dirección definida por el dispositivo háptico. El cambio de posición y orientación es procesado por el módulo de cirugía empleando la matriz de transformación homogénea  $T$ , Ec. 5.3[221], la cual afecta la posición por medio de la Ec. 5.4 y la orientación empleando la Ec. 5.5, de los modelos gráfico, físico y háptico generados tras el segmentado del modelo virtual. La Figura 5.3 muestra el esquema general de la transformación homogénea de coordenada empleada por el módulo de cirugía de modelos.

$$T = \begin{bmatrix} \text{Rotación}_{3 \times 3} & \text{Traslación}_{3 \times 1} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\text{Traslación} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

donde  $p_x$ ,  $p_y$ , y  $p_z$  corresponde a la traslación efectuada sobre los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , respectivamente.

$$\text{Rotación} = R_{z,\phi} R_{y,\theta} R_{x,\psi} = \begin{bmatrix} c\phi c\theta & -c\phi s\theta s\psi + s\phi c\psi & c\phi s\theta c\psi + s\phi s\psi \\ s\phi c\theta & s\phi s\theta s + c\phi c\psi & s\phi s\theta c\psi - c\phi s\psi \\ -s\theta & c\theta s\psi & c\theta c\psi \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

donde  $\phi$ ,  $\theta$ , y  $\psi$  es la rotación en grados efectuada sobre los ejes  $x$ ,  $y$ , y  $z$ , respectivamente.

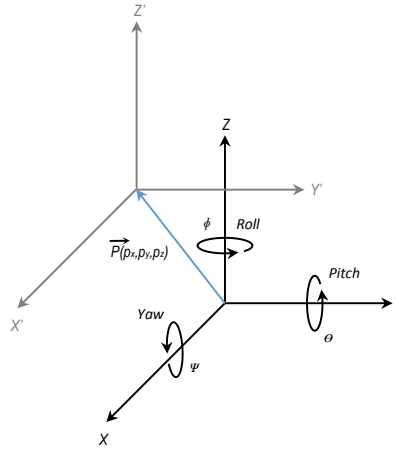


Figura 5.3 Esquema de transformación homogénea de coordenadas empleada por el módulo de cirugía de modelos.

Al afectar el segmento seleccionado por la matriz de transformación  $T$ , el módulo gráfico muestra en el ambiente virtual el modelo gráfico del segmento seleccionado en la nueva posición y orientación. La nueva posición y orientación son retroalimentadas al usuario sobre el panel del módulo de cirugía de modelos. Sobre el modelo gráfico del segmento también se afectan el modelo háptico y el modelo físico virtual por medio de la matriz de transformación  $T$ . El reposicionamiento y reorientación del modelo háptico permiten al sistema

brindar al usuario la retroalimentación háptica del segmento seleccionado en la nueva posición definida. El reposicionamiento del modelo físico virtual permite al módulo físico-háptico detectar si existen colisiones entre segmentos virtuales y prevenir la sobreposición de modelos. Si la nueva posición del fragmento seleccionado involucra la sobreposición de modelos, el módulo físico-háptico retroalimenta al usuario por medio del sistema háptico la fuerza de reacción requerida para evitar la sobreposición; lo anterior siempre y cuando se encuentre activo el sensor de colisiones ubicado en el panel del módulo de cirugía de modelos.

Una de las principales funcionalidades del módulo de cirugía de modelos es la capacidad de restringir los grados de libertad durante el desplazamiento y orientación de los objetos virtuales. Esto se obtiene al desactivar la adquisición de las coordenadas en la dirección deseada sobre el panel de cirugía de modelos. Esta funcionalidad permite al usuario restringir el desplazamiento y orientación del fragmento seleccionado durante la manipulación háptica.

Además del dispositivo háptico, es posible generar el reposicionamiento de los fragmentos óseos mediante el teclado y ratón de la computadora. A través del panel de cirugía de modelos, el usuario puede introducir mediante el teclado de la computadora la nueva posición y orientación del segmento virtual seleccionado, o emplear el ratón de la computadora para seleccionar la nueva posición empleando los controles de posición y orientación ubicados en el panel de cirugía de modelos. Al introducir la nueva posición y orientación, la matriz de transformación  $T$  afecta al fragmento virtual seleccionado ubicándolo en la posición y orientación definida. Si la opción de detección de colisiones se encuentra activa y la nueva posición indicada involucra la sobreposición de modelos, el fragmento no se desplazará a la posición indicada. Posteriormente si se introduce una posición que no involucre sobreposición de modelos, el sistema permitirá que el fragmento virtual se sitúe en su nueva posición u orientación.

Una vez definida la posición final de los fragmentos virtuales, Figura 5.4; el módulo de cirugía de modelos genera de forma automática un reporte de reposicionamiento maxilar. El reporte de reposicionamiento maxilar contiene la información relevante para el médico durante la cirugía. El reporte incluye el procedimiento ortognático simulado y requerido para corregir la problemática de desalineación maxilar del paciente. Además, el reporte incluye el desplazamiento maxilar requerido por el paciente tomando en cuenta el grado de proyección, impacto y alineación lateral maxilar; así como los grados de rotación requeridos. La Figura 5.5 muestra el reporte de reposicionamiento maxilar generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.



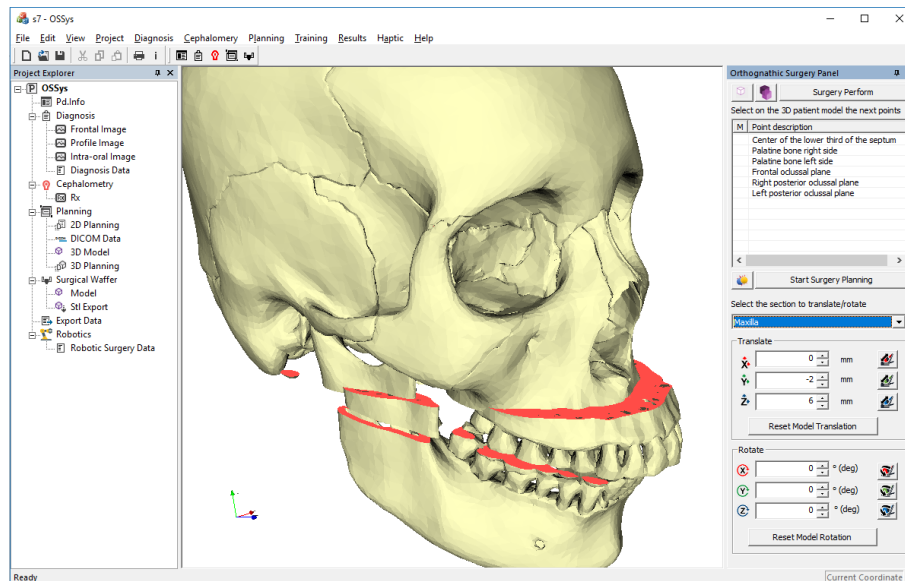


Figura 5.4 Fragmentos maxilares reposicionados virtualmente empleando la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

**OSSys v2.0**  
**S2\_Surgery Planning**

BSSO	
Mandible Setfront (+)	15.00 mm
Mandible Setback (-)	0.00 mm
Mandible Set-right (+)	0.00 mm
Mandible Set-lefth (-)	mm
	0.00
Mandible Set-up (+)	0.00 mm
Mandible Set-down(-)	-4.00 mm
Mandible proclinated	0.0 deg
Mandible retroclinated	0.0 deg

Desplazamiento maxilar requerido por el paciente

Procedimiento quirúrgico ortognático requerido por el paciente

Figura 5.5 Reporte de reposicionamiento maxilar generado por el módulo de cirugía de modelos de OSSys v2.0.

### 5.1.4 Interfaz de usuario

El acceso a las herramientas del módulo de cirugía de modelos se realiza a partir de la opción *Launch 3D Planning* de la opción *Planning* del menú principal de OSSys v2.0. La Figura 5.6 muestra los paneles asociados al módulo de cirugía virtual de modelos, las herramientas y menús que lo integran.

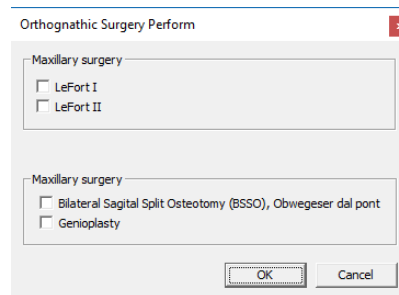
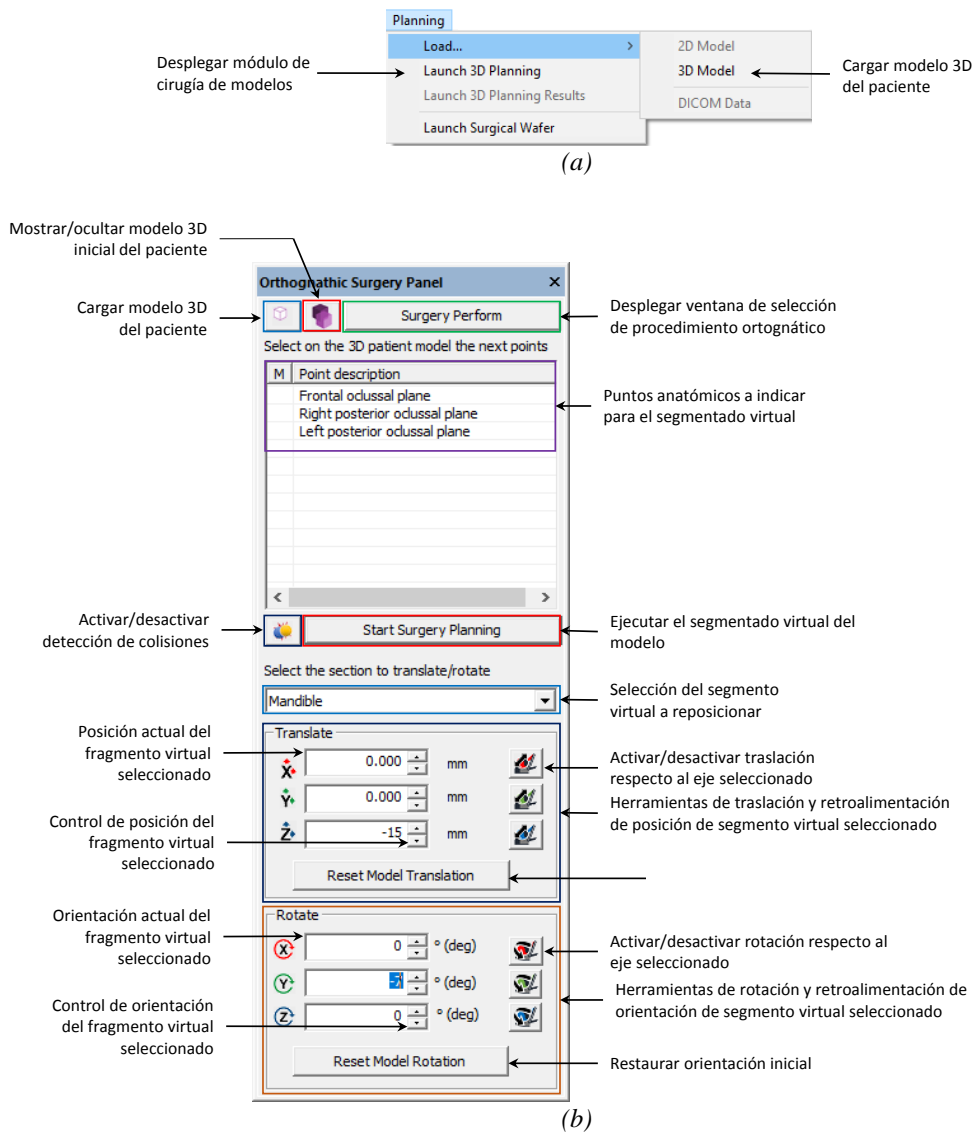
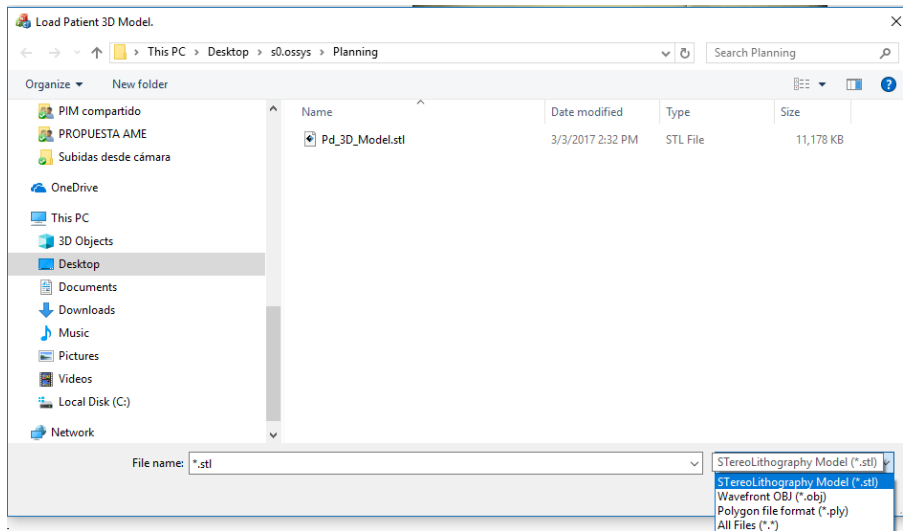


Figura 5.6 Interfaz gráfica del módulo de cirugía virtual de modelos: a) menú Planning de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas del módulo, c) ventana de selección del proceso ortognático a simular, y d) ventana de explorador de archivos par



(d)

Figura 5.6. Interfaz gráfica del módulo de cirugía virtual de modelos: a) menú Planning de la barra principal de herramientas, b) panel de herramientas del módulo, c) ventana de selección del proceso ortognático a simular, y d) ventana de explorador de archivos para la carga del modelo 3D del paciente, (continuación).

### 5.1.5 Características generales

En la Figura 5.7 se muestra una comparación entre el proceso de cirugía de modelos tradicional y el proceso de cirugía de modelos virtual en OSSys. Las principales características del módulo de cirugía virtual de modelos son las siguientes:

- El modelo tridimensional del paciente puede ser cargado en formato OBJ o STL.
- Se integra la percepción espacial, el reconocimiento de formas y la retroalimentación de fuerza en el proceso de segmentado del modelo y reposicionamiento mediante la tecnología háptica.
- La segmentación de modelos virtuales es asistida por medio del sistema háptico.
- El segmentado múltiple del modelo 3D del paciente es posible de forma simultánea.
- El reposicionamiento de segmentos óseos virtuales es posible en 6 grados de libertad empleando el dispositivo háptico, el teclado o el ratón de computadora.
- El movimiento en una o dos direcciones de los segmentos óseos virtuales durante el proceso de reposicionamiento puede ser restringido.
- La posición de cada segmento óseo es renderizada en tiempo real.
- Se integra la detección de colisiones entre los segmentos virtuales de hueso, pudiendo ser deshabilitada para permitir o evitar la sobreposición maxilar de modelos virtuales.
- Se genera de forma automática un informe de reposicionamiento maxilar en formato xls.

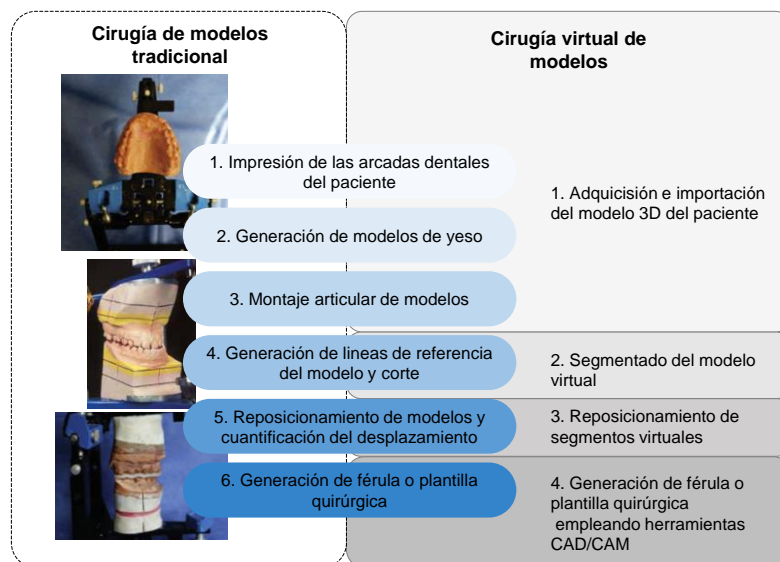


Figura 5.7 Comparación entre el método tradicional y virtual de cirugía de modelos.

## 5.2 Plantilla quirúrgica virtual

El proceso tradicional de generación de la plantilla quirúrgica consiste en moldearacrílico sobre las arcadas dentales de los modelos de yeso reposicionados. Elacrílico al ser moldeado adquiere la forma de la oclusión o mordida del paciente, la cual reproduce la nueva posición maxilar. Posterior al moldeado, elacrílico es reposado sobre los modelos de yeso hasta su curado y endurecimiento. Una vez que la plantilla quirúrgica se ha curado por completo, la plantilla puede emplearse en quirófano con la finalidad de transferir al paciente el plan quirúrgico y lograr el reposicionamiento maxilar definido previamente [3]. La generación de la férula quirúrgica es la etapa final del proceso de planeación quirúrgica y es de gran relevancia debido a que es el medio por el cual se transfiere al paciente los resultados del proceso de planeación durante la cirugía real. Por lo tanto, los errores en el proceso de moldeado son transferidos directamente al procedimiento quirúrgico real.

En la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0, se han integrado herramientas CAD para el diseño virtual de las plantillas quirúrgicas. Estas herramientas de CAD permiten al médico generar la plantilla dentro del entorno virtual y, sin conocimiento o experiencia previa en los sistemas CAD empleados en ingeniería. El diseño de la férula quirúrgica se genera a partir de un modelo 3D parametrizado. El modelo 3D parametrizado tiene una forma similar a los arcos maxilares, y se crea como un modelo en formato OBJ hecho de una malla triangular. Los parámetros de diseño iniciales se obtienen a partir de los puntos de referencia anatómicos indicados por el usuario durante el proceso de segmentación virtual ósea, los cuales son utilizados por el sistema para proponer automáticamente la forma, las dimensiones y la posición de la férula virtual en 6 grados de libertad. El especialista puede analizar y modificar, si es necesario, los parámetros de diseño y la posición antes del grabado oclusal. Finalmente, se genera un modelo virtual de la férula quirúrgica con el grabado oclusal en formato STL. El modelo en formato STL puede fabricarse empleando técnicas modernas de manufactura como la manufactura aditiva o herramientas de manufactura asistida por computadora como el maquinado por control numérico computarizado. Una vez fabricada la férula quirúrgica, esta puede emplearse como herramienta de reposicionamiento maxilar durante la cirugía ortognática real, transfiriendo de esta manera los resultados del proceso de planeación quirúrgica al paciente.

### 5.2.1 Procedimiento general

El proceso general de generación de la férula quirúrgica se muestra en la Figura 5.8 y comienza una vez que se ha efectuado el reposicionamiento maxilar empleando el módulo de cirugía de modelos. Al haber efectuado el reposicionamiento maxilar, se despliega el módulo de generación de férula quirúrgica empleando la opción *Launch Surgical Wafer* del submenú *Planning* ubicado en el menú principal de la interfaz gráfica de OSSys v2.0. Al desplegar el módulo de generación virtual de la plantilla quirúrgica, el sistema ejecuta el cálculo automático de los parámetros y posición de la férula quirúrgica mediante la opción *Automatic Wafer Size and Position*. El módulo adquiere el tipo de procedimiento ortognático simulado en la cirugía de modelos y define si se requiere la plantilla quirúrgica. La plantilla quirúrgica es tradicionalmente requerida para los procedimientos ortognáticos LeFort I, LeFort II y BSSO. Si la genioplastia (mentoplastía) fue el procedimiento seleccionado en la cirugía virtual de modelos, se despliega un aviso al usuario indicando que la generación de férula quirúrgica no es requerida

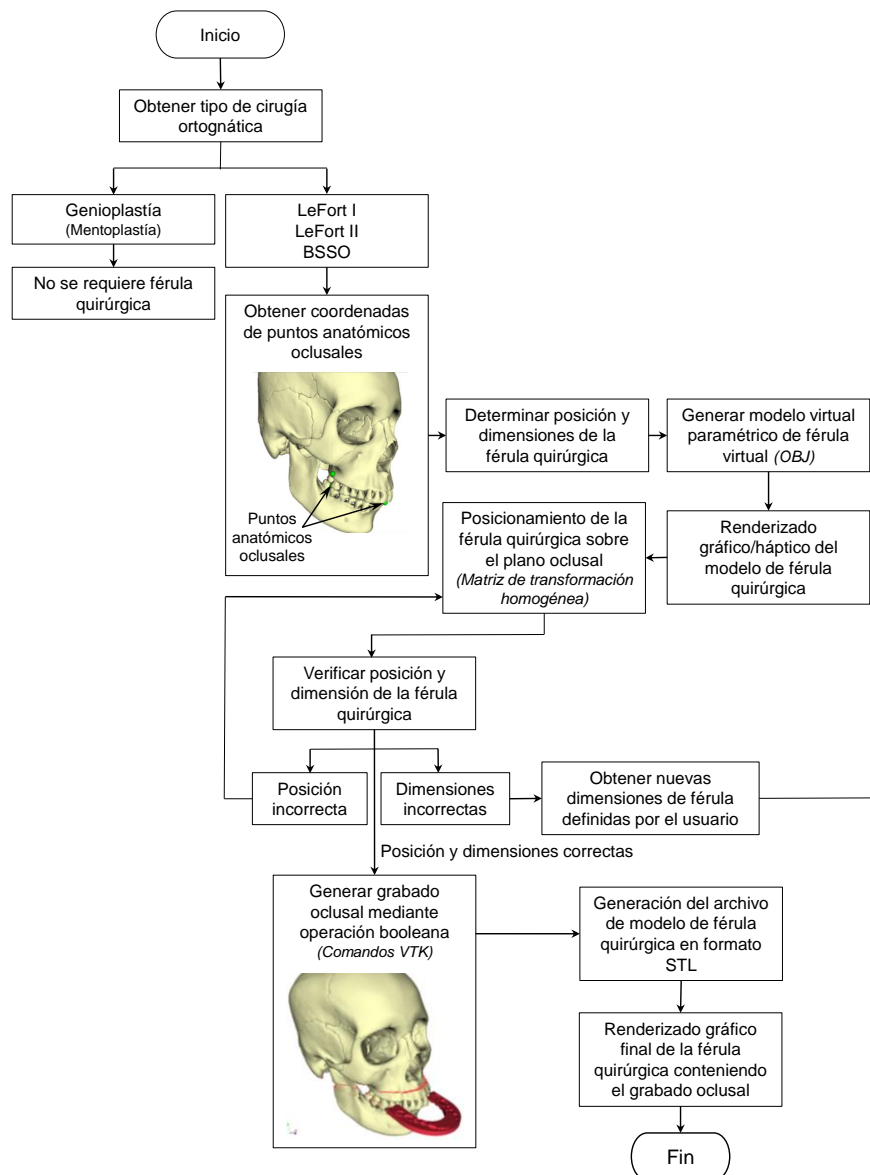


Figura 5.8 Proceso general de generación de la plantilla quirúrgica empleando OSSys v2.0.

### 5.2.2 Generación paramétrica del modelo virtual de plantilla quirúrgica

Si en la etapa de cirugía virtual de modelos se efectuó un procedimiento ortognático que requiere la generación de plantilla quirúrgica, el módulo de generación de férula quirúrgica obtiene las coordenadas de los puntos anatómicos oclusales, Figura 5.9. A partir de las coordenadas de los puntos oclusales se calculan los parámetros de diseño propuestos para el modelo inicial de férula, Figura 5.10. Dentro de los parámetros de diseño el ancho  $w$  es propuesto de acuerdo al valor medio del ancho molar que es 12 mm y el espesor  $t$  en base al espesor de férula tradicional de 3.5mm.

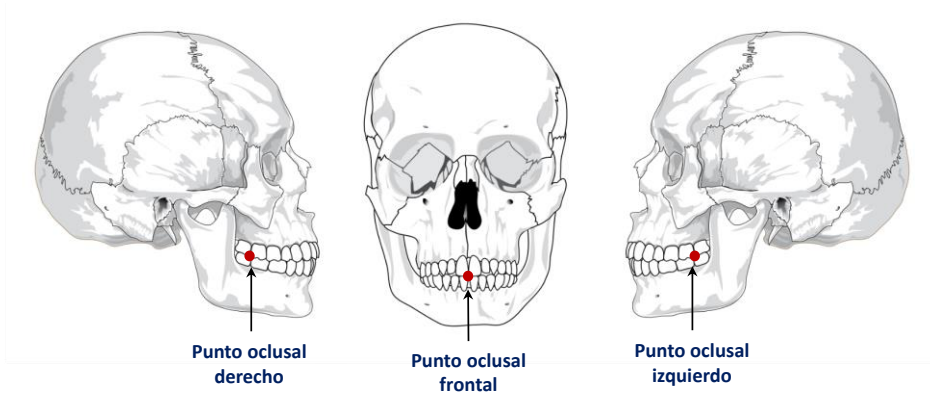


Figura 5.9 Puntos anatómicos oclusales.

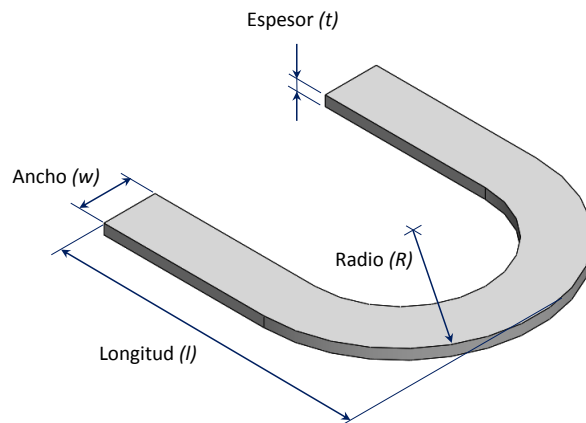


Figura 5.10 Parámetros de diseño del modelo inicial de férula quirúrgica.

Empleando la Ec. 5.6 y Ec. 5.7 y, las coordenadas de los puntos oclusales definidas por el usuario, el módulo de generación de férula quirúrgica calcula el radio externo  $R$  y longitud  $l$  de la férula quirúrgica, respectivamente.

$$R = \frac{\sqrt{(X_{pPOcc-I} - X_{pPOcc-D})^2 + (Y_{pPOcc-I} - Y_{pPOcc-D})^2}}{2} \quad (5.6)$$

donde  $R$  es radio,  $X_{pPOcc-I}$  y  $Y_{pPOcc-I}$  las coordenadas en el eje  $x$  y  $y$  del punto oclusal izquierdo, y  $X_{pPOcc-D}$  y  $Y_{pPOcc-D}$  las coordenadas del eje  $x$  y  $y$  del punto oclusal derecho.

$$l = \sqrt{\left[ \left( \frac{Z_{pOcc-I} + Z_{pOcc-D}}{2} \right) - Z_{pOcc-F} \right]^2} \quad (5.7)$$

donde  $l$  es la longitud total de la férula,  $Z_{pOcc-I}$  la coordenada en z del punto oclusal izquierdo,  $Z_{pOcc-D}$  la coordenada en z del punto oclusal derecho, y  $Z_{pOcc-F}$  la coordenada en z del punto oclusal frontal.

Tras obtener los parámetros de diseño del modelo inicial de férula que fueron propuestos por el sistema o introducidos por el usuario, se genera un modelo 3D en formato OBJ al pulsar *Generate Model/Refresh*. El modelo 3D generado asemeja la forma geométrica de las arcadas dentales del paciente. El proceso de creación del modelo 3D de la férula quirúrgica en formato OBJ se efectúa formando una malla virtual. La malla generada corresponde a la superficie del objeto tridimensional, y está compuesta de puntos geométricos que definen los nodos. A partir de las coordenadas de los nodos se generan elementos triangulares, los cuales son generados identificando los nodos adyacentes que forman una superficie triangular. El conjunto de elementos triangulares conforman la geometría del modelo 3D [222].

El modelo inicial de férula quirúrgica se conforma por 732 nodos y 1460 elementos. Las coordenadas de los nodos de la geometría del modelo de férula son generadas mediante la siguiente ecuación:

$$n_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T \quad i = 1 \rightarrow 732 \quad (5.8)$$

$$x_i = \begin{cases} R & \text{Si } i = 1, 367 \\ R - w & \text{Si } i = 184, 550 \\ -R & \text{Si } i = 183, 549 \\ w - R & \text{Si } i = 366, 732 \\ R \cos(i-2) & \text{Si } i = 2 \rightarrow 182, 368 \rightarrow 548 \\ (R - w) \cos(i-2) & \text{Si } i = 185 \rightarrow 365, 551 \rightarrow 731 \end{cases} \quad y_i = \begin{cases} -\frac{t}{2} & \text{Si } i = 1 \rightarrow 366 \\ \frac{t}{2} & \text{Si } i = 367 \rightarrow 732 \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} R - L & \text{Si } i = 1, 183, 184, 366, 367, 549, 550, 732 \\ R \sin(i-2) & \text{Si } i = 2 \rightarrow 182, 185 \rightarrow 365, 368 \rightarrow 548, 551 \rightarrow 731 \end{cases}$$

donde  $n_i$  es el conjunto de coordenadas del nodo,  $i$  el número de nodo,  $x_i$ ,  $y_i$ , y  $z_i$  las coordenadas en los ejes  $x$ ,  $y$  y  $z$  del nodo  $i$ ,  $R$  el radio de la férula quirúrgica,  $t$  el espesor de la férula quirúrgica, y  $w$  el ancho de la férula quirúrgica

Finalmente, el archivo de texto que contiene las coordenadas de cada nodo y la secuencia de nodos que generan elementos triangulares es almacenado con la extensión OBJ. La Figura 5.11, muestra el archivo de texto que incluye las coordenadas y elementos que conforman la superficie 3D del modelo virtual de una férula quirúrgica.

```

srgTemplateNativeModel1.obj - Notepad
File Edit Format View Help
# OSSys v2.0 Orthognathic Surgery System v2.0 Planning module
# Surgical maxillar reposition template (surgical waffer)
# **This *.obj file was generated by OSSys v2.0**

# Vertices coordinates
v 0.036859 0.000000 -0.017282
v 0.036859 0.005000 -0.017282
v 0.036859 0.000000 0.000000
v 0.036859 0.005000 0.000000
v 0.036837 0.000000 0.001286
v 0.036837 0.005000 0.001286
v 0.036769 0.000000 0.002571
v 0.036769 0.005000 0.002571
v 0.036657 0.000000 0.003853
v 0.036657 0.005000 0.003853
v 0.036500 0.000000 0.005130
v 0.036500 0.005000 0.005130
v 0.036299 0.000000 0.006400
v 0.036299 0.005000 0.006400
v 0.036054 0.000000 0.007663
v 0.036054 0.005000 0.007663
v 0.035764 0.000000 0.008917
v 0.035764 0.005000 0.008917
v 0.035431 0.000000 0.010160
v 0.035431 0.005000 0.010160
v 0.035055 0.000000 0.011390
v 0.035055 0.005000 0.011390
v ...

# Faces
f 1 2 3
f 2 3 4
f 3 4 5
f 4 5 6
f 5 6 7

```

Coordinadas de los nodos del modelo de plantilla quirúrgica

Generación de elementos superficiales del modelo de férula quirúrgica

Figura 5.11 Archivo de texto del modelo inicial de férula quirúrgica generado en formato OBJ.

### 5.2.3 Grabado oclusal

Después de generar el modelo 3D inicial de férula en formato OBJ, la plantilla se renderiza en el ambiente virtual de OSSys y se genera su representación háptica. Tras el renderizado, la férula se posiciona sobre el plano oclusal del paciente pulsando la opción *Auto-align* del módulo de generación de plantilla quirúrgica. La opción *Auto-align* adquiere la posición y orientación del plano oclusal del paciente, sobre el cual ubica el modelo de férula empleando la matriz de transformación homogénea  $T$ . Si la posición del modelo inicial de férula es errónea, el usuario puede desplazar la plantilla quirúrgica en 6 grados de libertad utilizando el dispositivo háptico, el teclado o el ratón de computadora hasta obtener la ubicación correcta. El proceso de reposicionamiento se efectúa mediante el módulo de generación de plantilla quirúrgica el cual utiliza las herramientas de reposicionamiento maxilar implementadas en el módulo de cirugía de modelos.

Al haber situado el modelo 3D de férula quirúrgica en su posición final, se procede a la generación del grabado oclusal. El grabado oclusal se realiza mediante una operación booleana de diferencia [223, 224]. La operación booleana, incluida en las funciones implícitas de la biblioteca gráfica VTK [211], opera sobre un conjunto de dos o más modelos 3D formados por polígonos, siendo compatible con los objetos 3D en formato OBJ y STL empleados en la plataforma virtual háptica OSSys v2.0. La operación booleana de diferencia es una herramienta empleada en el área de la computación gráfica y las aplicaciones CAD orientadas a la ingeniería. Su función comienza con la identificación de dos modelos poligonales P1 y P2 que se superponen en una sección. Las caras de la sección superpuesta del modelo poligonal P1 son extraídas del modelo P2, como muestra la Figura 5.12. Debido a que cada punto de intersección de P1 genera un nodo sobre P2 es posible generar las caras y vértices del modelo resultante eliminando P1 [223, 224].



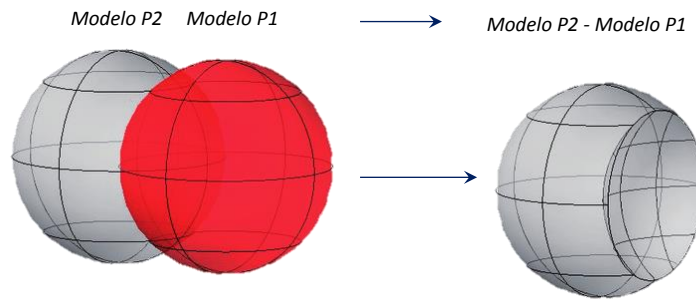


Figura 5.12 Operación booleana de diferencia gráfica.

Como resultado de la operación booleana entre los segmentos maxilares reposicionados y el modelo inicial de férula se obtiene el diseño final de plantilla quirúrgica. El diseño final de la plantilla quirúrgica es almacenado automáticamente como un archivo STL para ser utilizado en el proceso de fabricación, como el mecanizado CNC o la manufactura aditiva. La Figura 5.13 muestra un ejemplo del diseño final de una férula quirúrgica.

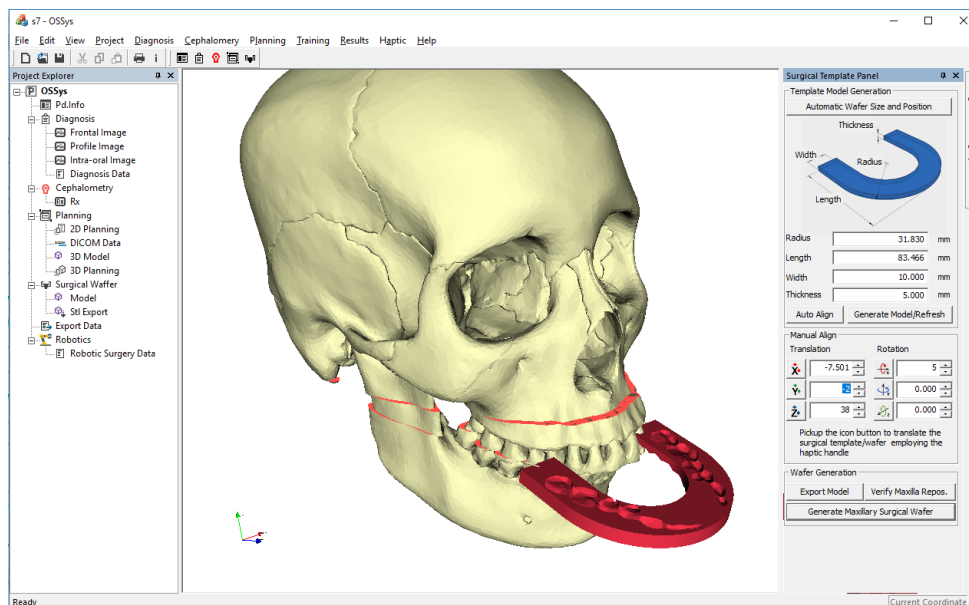


Figura 5.13 Modelo de férula quirúrgica con el grabado oclusal, generada en la plataforma OSSys v2.0.

#### 5.2.4 Interfaz de usuario

El acceso a las herramientas del módulo de generación de férula quirúrgica se efectúa a partir de la opción *Launch Surgical Wafer* del apartado *Planning* del menú principal de OSSys v2.0. La Figura 5.14 muestra los paneles asociados al módulo de generación de plantilla quirúrgica y las herramientas que lo integran.

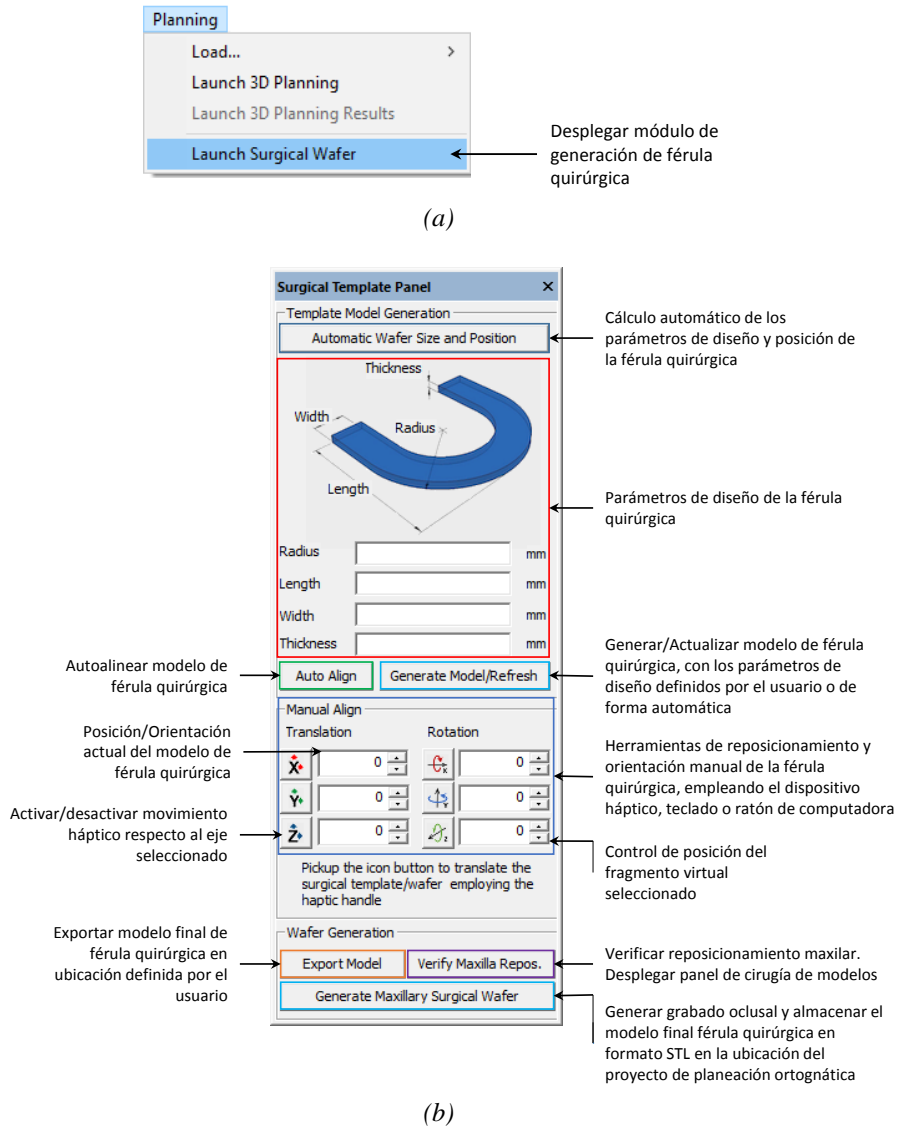


Figura 5.14 Interfaz gráfica del módulo de generación de plantilla quirúrgica: a) menú Planning de la barra principal de herramientas, y b) panel de herramientas del módulo.

### 5.2.5 Características generales

Las principales características del módulo de generación virtual de plantilla quirúrgica son las siguientes:

- El diseño de la férula quirúrgica es asistido por el sistema, es decir, las dimensiones, forma y la posición son propuestas automáticamente por el sistema y pueden ser modificadas por el usuario.
- La reposición virtual de la plantilla se puede realizar empleando el dispositivo háptico, PC-mouse o teclado en sus 6 grados de libertad.
- El modelo final de férula quirúrgica se genera en un formato compatible con la manufactura aditiva y los sistemas CAM.

### 5.3 Discusión general

Los módulos de cirugía de modelos y generación de plantillas quirúrgicas incluidos en la plataforma virtual-háptica OSSys brindan al cirujano la capacidad de efectuar de manera virtual las tareas de determinación del reposicionamiento maxilar y la generación de la férula quirúrgica en un ambiente virtual. La incorporación de herramientas de diseño de ingeniería (como los sistemas CAD/CAE/VR) dentro de la plataforma OSSys facilitan la generación un plan quirúrgico de forma integral, sin requerirse los instrumentos del proceso tradicional de planeación ortognática. Los instrumentos de planeación tradicional como el articulador, los modelos de yeso de las arcadas dentales del paciente y los dispositivos manuales de medición son substituidas por el modelo 3D del paciente, herramientas virtuales CAD y sistemas hápticos. Estas herramientas virtuales, comúnmente empleadas en áreas de la ingeniería mecánica, permiten al cirujano segmentar el modelo maxilar del paciente, cuantificar el desplazamiento maxilar y generar la férula quirúrgica de manera asistida por computadora. Estas características de la cirugía virtual de modelos brindan beneficios en términos de tiempo y costos, al reducir la intervención del médico en determinadas tareas del proceso de planeación ortognática. El proceso de cirugía virtual de modelos reduce el tiempo de planeación al eliminar la tarea de toma de modelos de yeso de las arcadas dentales del paciente, suprimir las operaciones de montaje y alineación de los modelos del yeso sobre el articulador maxilar. Además, la plataforma OSSys v2.0 anula la tarea de reposicionar los modelos de yeso mediante el corte manual y el uso de cera, como ocurre en el proceso de planeación tradicional. De esta manera se disminuyen los errores de reposicionamiento manual de los modelos de yeso sobre el articulador y los errores producidos por la contracción acrílica.

En la planeación tradicional de la cirugía ortognática la férula quirúrgica generalmente es fabricada por el especialista modelando resina manualmente sobre los modelos de yeso reposicionados. Sin embargo, con la integración de las herramientas CAD en la plataforma de planeación virtual de cirugía ortognática, es posible diseñar la férula quirúrgica de forma asistida sin la necesidad de que el cirujano tenga un conocimiento previo de los sistemas CAD. Además, es posible fabricar la plantilla quirúrgica mediante tecnologías de manufactura aditiva sin que el médico intervenga durante el proceso de fabricación.

Para verificar la eficiencia de los módulos de cirugía de modelos y generación de férula quirúrgica incluidos en la plataforma virtual-háptica, en el capítulo 6 se presenta la evaluación de las funcionalidades de la plataforma virtual háptica como herramienta de planeación quirúrgica. Donde se comprueba que los módulos de cirugía de modelos y generación de férula quirúrgica representan una alternativa mejorada para el reposicionamiento maxilar y la producción de férulas quirúrgicas intraorales.



## Capítulo 6. Evaluación del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas

En este capítulo se presenta la evaluación de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 propuesta como una herramienta de planeación de cirugías ortognáticas. Los resultados logrados son contrastados con los resultados obtenidos mediante el método de planeación tradicional tras la evaluación de un caso de estudio real.

### 6.1 Objetivo de evaluación

La evaluación del sistema para la planeación virtual-háptica de cirugías ortognáticas OSSys v2.0 tiene como objetivo comprobar las siguientes hipótesis:

1. El uso de un sistema de realidad virtual asistido por sistemas hápticos permite incrementar el desempeño del proceso de planeación quirúrgica ortognática al reducir el tiempo invertido por el cirujano, en comparación con el proceso tradicional.
2. Los resultados del proceso de planeación virtual de cirugía ortognática son válidos al igual que los resultados obtenidos por el proceso de planeación tradicional.
3. Mediante el uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos es posible simular y planear de manera integral el procedimiento quirúrgico maxilar ortognático.

### 6.2 Caso de estudio

Con la finalidad de evaluar la funcionalidad y el rendimiento del sistema OSSys v2.0 propuesto, se seleccionó un caso de estudio de entre un grupo de pacientes de la especialidad en ortodoncia y cirugía maxilar del Centro de Posgrado de la Facultad de Estomatología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Los criterios considerados para la selección del paciente se enfocaron en la búsqueda de un paciente con problemas de desalineación maxilar, candidato a cirugía ortognática y con la disponibilidad de ser caso de estudio. De esta manera el caso seleccionado corresponde a un paciente varón de 25 años con problemas de maloclusión, y candidato a un procedimiento quirúrgico ortognático.

Para el análisis del caso de estudio se adquirieron fotografías frontal y lateral del paciente, así como una tomografía computarizada de la cabeza del paciente. La Figura 6.1 muestra las fotografías frontal y lateral del paciente, las cuales fueron tomadas usando una cámara fotográfica Canon® EOS 5D Mark III, con una resolución de 5760x3840 píxeles. Durante el proceso de captura de las fotografías se cuidó mantener la postura natural del paciente apoyando la parte superior de la espalda sobre una superficie recta.



Figura 6.1 Fotografías del paciente: a) frontal de rostro, b) lateral de rostro.

Posteriormente se adquirieron la radiografía lateral de cráneo y la tomografía computarizada. Para la captura de la radiografía lateral, Figura 6.2 (a), se empleó un sistema de rayos X VATECH Pax-i SC CMOS, un tamaño de imagen de 210x230mm y un tiempo de exposición de 3s. Al momento de la captura de la radiografía lateral se fijó la cabeza del paciente en 3 puntos de contacto cuidando la posición natural de la cabeza [225]. La tomografía computarizada se obtuvo utilizando un tomógrafo EVO NewTom VGi con una resolución de voxel de 200  $\mu$ m, 16 bits y un tiempo de exposición de 25seg. Durante la adquisición de la tomografía computarizada se apoyó la cabeza del paciente en 7 puntos de contacto para garantizar la posición natural de la cabeza [225-227].

El modelo 3D del paciente se reconstruyó a partir de los datos CT, y se orientó para que coincidiera con el sistema de coordenadas del entorno virtual empleando los comandos ITK y VTK. La resolución del modelo digital del paciente resultante constó de 907 355 vértices y 1 831 238 elementos, lo cual fue lo suficientemente precisa para que los cirujanos pudieran sentir, identificar y seleccionar puntos de referencia mediante el dispositivo háptico. La Figura 6.2 (b) muestra el modelo 3D del cráneo del paciente reconstruido a partir de los datos de CT.

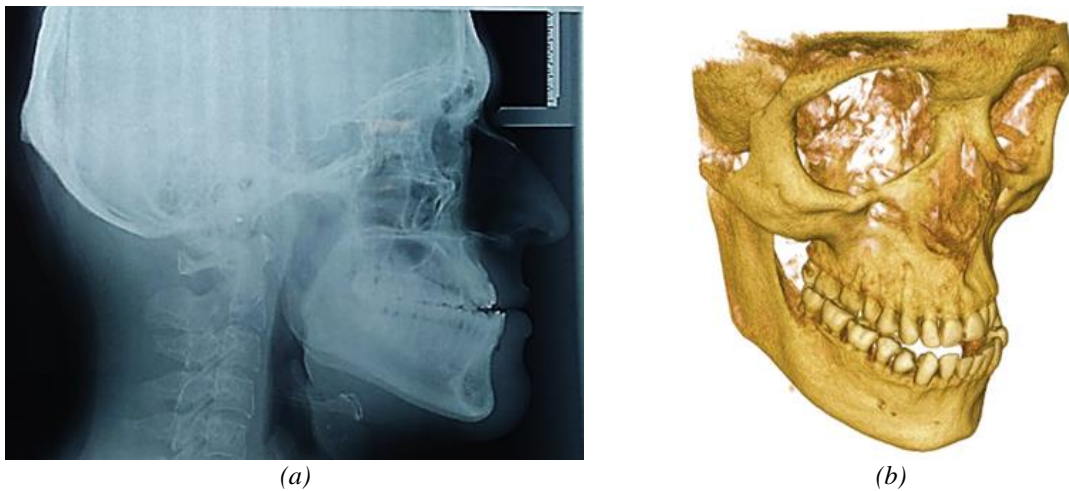


Figura 6.2 Información digital del paciente: a) radiografía lateral de cráneo, b) modelo 3D del cráneo del paciente.

### 6.3 Metodología de evaluación

El procedimiento de evaluación de la plataforma OSSys v2.0 se llevó a cabo utilizando el caso de estudio descrito anteriormente y siguiendo la metodología que se muestra en la Figura 6.3. Un total de 6 cirujanos maxilofaciales evaluaron el sistema: 3 expertos en cirugía maxilofacial, con más de 7 años de experiencia; y 3 recién egresados de la especialidad de ortodoncia y cirugía maxilar. Todos los participantes eran diestros, y ninguno de ellos tenía experiencia previa en sistemas hápticos o de realidad virtual.

El proceso de evaluación consistió en dos etapas con al menos una semana de diferencia entre ellas. En la primera etapa cada participante analizó el caso de estudio empleando el proceso tradicional de planeación de cirugía ortognática. En la segunda etapa cada participante empleó la plataforma OSSys v2.0 para analizar de forma individual el caso de estudio. En la etapa de planificación tradicional, cada participante adquirió individualmente los modelos dentales y fotografías del paciente. Sin embargo, en la etapa virtual, cada participante recibió entrenamiento previo en el uso y herramientas de la plataforma OSSys v2.0 y los sistemas hápticos. Durante el periodo de entrenamiento, los participantes ejecutaron de forma individual cinco ensayos de planificación quirúrgica empleando modelos 3D genéricos y radiografías laterales. Después del período de entrenamiento, cada participante recibió la siguiente información digital del caso de estudio: las fotografías

frontales y laterales del rostro del paciente, la radiografía sagital de cráneo y el modelo 3D del cráneo del paciente.

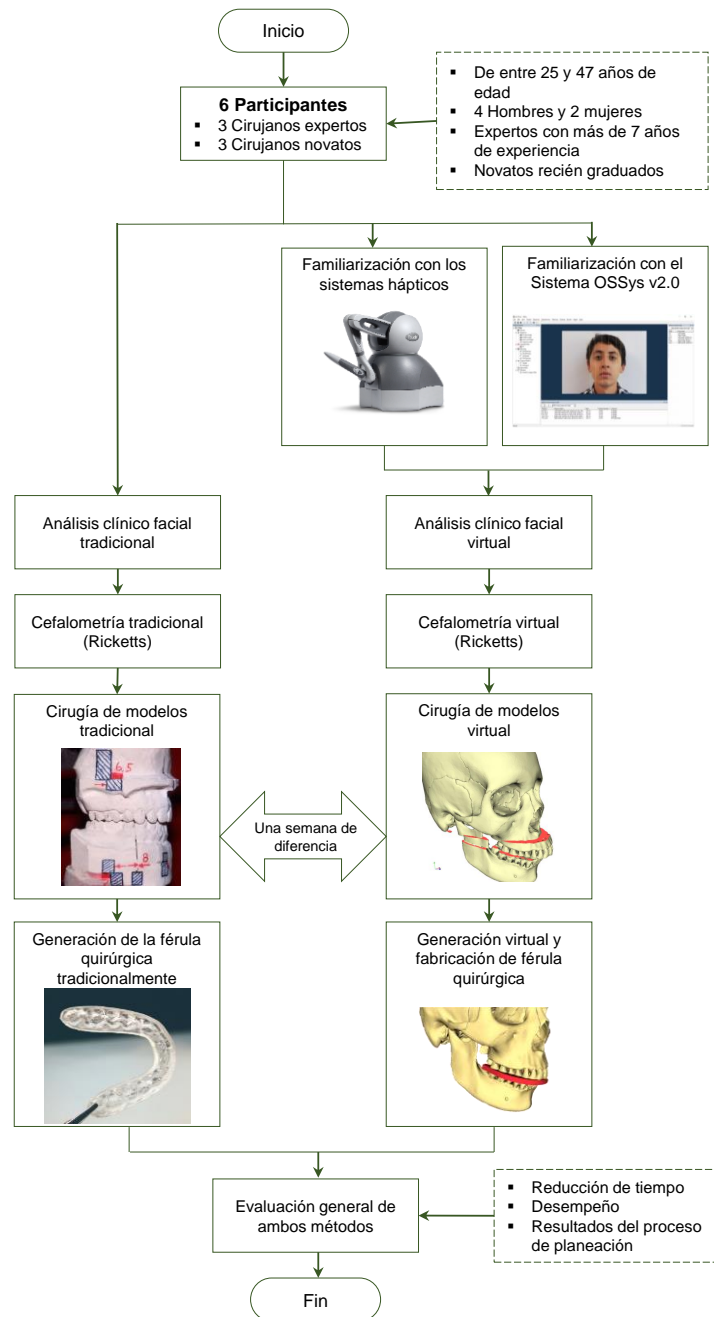


Figura 6.3 Metodología general del proceso de evaluación de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

Para probar las hipótesis definidas, se establecieron métricas de evaluación. Las métricas de evaluación fueron establecidas en base a cada hipótesis y a la información quirúrgica requerida por el especialista, para cuantificar el cumplimiento de cada una de las hipótesis. Las métricas establecidas para cada hipótesis se muestran en la Tabla 6.1. Estas métricas fueron expuestas a los médicos evaluadores, con la finalidad de que fuesen

cuantificadas en el desarrollo de cada etapa del proceso de planeación virtual y tradicional del caso de estudio, para su posterior análisis.

Tabla 6.1 Métricas de evaluación definidas para la evaluación del sistema OSSys v2.0.

Hipótesis	Métricas definida
El uso de un sistema de realidad virtual asistido por sistemas hápticos permite incrementar el desempeño del proceso de planeación quirúrgica ortognática al reducir el tiempo invertido por el cirujano, en comparación con el proceso tradicional.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo invertido en efectuar cada etapa del proceso de planeación (min)</li> <li>• Índice de desempeño.</li> </ul>
Los resultados del proceso de planeación virtual de cirugía ortognática son válidos al igual que los resultados obtenidos por el proceso de planeación tradicional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información quirúrgica extraída en cada etapa del proceso de evaluación.</li> </ul>
Mediante el uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos es posible simular y planear de manera integral el procedimiento quirúrgico maxilar ortognático.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Información quirúrgica extraída en cada etapa del proceso de evaluación.</li> </ul>

Dentro de las métricas establecidas el tiempo invertido en cada etapa del proceso de planeación de OGS permite determinar el desempeño del proceso de planeación basado en tiempo para los enfoques tradicional y virtual, y su posterior comparación. Además permite el cálculo del índice de desempeño  $D$  empleando la Ec. 6.1, donde  $t_{trad}$  corresponde al tiempo dedicado en efectuar cada etapa del proceso de planeación de OGS empleando el enfoque tradicional, y  $t_{virtual}$  corresponde al tiempo dedicado a cada etapa del proceso de planeación de cirugía ortognática empleando el enfoque virtual. El índice de desempeño representa proporcionalmente que tantas veces tiene un mejor desempeño en términos de tiempo el enfoque virtual en comparación con el enfoque tradicional para cada etapa del proceso de planeación de OGS.

$$D = \frac{t_{trad}}{t_{virtual}} \quad (6.1)$$

La métrica referente a la información quirúrgica extraída en cada etapa del proceso de planeación es una métrica que se encuentra implícita en la plataforma OSSys v2.0. Y hace referencia a la capacidad del sistema OSSys v2.0 para generar información relevante en cada etapa del proceso de planeación y en la validez de los resultados obtenidos en comparación con el enfoque tradicional de planeación quirúrgica.

## 6.4 Resultados

Los resultados del proceso de evaluación se presentan y analizan a continuación.

### 6.4.1 Análisis facial

Los resultados obtenidos del análisis facial para los enfoques de planeación tradicional y virtual se presentan en la Tabla 6.2 y la Figura 6.4 muestra el resultado del análisis facial efectuado por la plataforma OSSys v2.0.



Tabla 6.2 Resultados de la evaluación del proceso de análisis facial, obtenidos empleando los métodos tradicional y virtual de planeación quirúrgica ortognática.

	Novatos		Expertos	
	Tradicional	Virtual	Tradicional	Virtual
Análisis de tercios faciales	Segundo tercio facial disminuido	Segundo tercio facial disminuido	Segundo tercio facial disminuido	Segundo tercio facial disminuido
Análisis de quintos faciales	Tercer quinto facial disminuido	Tercer quinto facial disminuido	Tercer quinto facial disminuido	Tercer quinto facial disminuido
Análisis de Powell	Tratamiento quirúrgico y ortodoncia	Tratamiento quirúrgico	Tratamiento quirúrgico y ortodoncia	Tratamiento quirúrgico
Tiempo medio para efectuar el proceso de análisis facial en minutos (D.E)	45 (5.24)	5.5 (2.07)	22 (4.73)	3.2 (1.04)
Índice de desempeño	8.18		6.87	
Índice de desempeño global, sin diferenciar entre novatos y expertos	7.70			

D.E: Desviación estándar.

<b>OSSys v2.0</b>					
<b>Thirds Analisis Results</b>					
Facial length (mm)	225.63				
Upper facial third	32.9%				
Middle facial third	29.8%				
Bottom Facial third	33.7%				
Diagnosis	Second facial third diminished				
<b>Fifth Analisis Results</b>					
Facial width (mm)	183.94				
External right facial fifth	20.2%				
Central right facial fifth	19.5%				
Central fifth	17.3%				
Central left facial fifth	19.6%				
External left facial fifth	20.4%				
Diagnosis	Central fifth diminished				
<b>Powell Analisis</b>					
Measure	Patient	Standard	Diagnosis		
Naso-facial angle	44.7	30-40	Surgical treatment		
Nasal-maxilla angle	133.4	120-132			
Nasal-lip angle	95	90-110			
Cervical-jaw angle	83.4	80-95			

Figura 6.4 Reporte de resultados de análisis facial empleando el enfoque virtual.

Los resultados obtenidos evidencian que el diagnóstico generado por ambos métodos de planeación ortognática es muy similar, concluyendo que el paciente requiere un tratamiento quirúrgico ortognático. La diferencia en el diagnóstico radica en que el método tradicional sugiere un tratamiento quirúrgico en conjunto con un tratamiento de ortodoncia, y el método virtual no. Esta diferencia se debe a que el proceso de cirugía ortognática involucra de forma implícita un tratamiento de ortodoncia previo y posterior a la planeación quirúrgica. El

tratamiento de ortodoncia permite al equipo de especialistas que planean la cirugía ortognática, controlar y corregir de forma mecánica desplazamientos de la oclusión que se originan durante el proceso de recuperación postquirúrgica. Por lo tanto, el diagnóstico emitido por OSSys v2.0 de forma virtual es válido al igual que el diagnóstico tradicional definido por los especialistas.

En el análisis de desempeño se empleó la métrica que cuantifica el tiempo invertido en efectuar cada etapa del proceso de planeación. Para conocer el desempeño que ofrece el módulo de análisis facial, se empleó el tiempo medio que toma efectuar el análisis facial de forma virtual y el tiempo medio en el cual se efectúa el análisis facial mediante el enfoque tradicional, despreciando la diferencia entre grupos de expertos y novatos. El tiempo medio de análisis facial en el enfoque tradicional corresponde a 33.50min, y el tiempo de análisis facial empleando el enfoque tradicional es de 4.35min, que representa el 12.98% del tiempo medio empleado en realizar el análisis facial de forma tradicional.

A partir de los tiempos requeridos para efectuar el análisis facial en ambos enfoques se obtiene un índice de desempeño global de 7.70. El índice de desempeño representa que el enfoque virtual brinda un desempeño 7.70 veces mayor que el enfoque tradicional, para la etapa de análisis facial. El aumento en el desempeño de la etapa de análisis facial empleando el método virtual se debe que se elimina el proceso de medición manual de las relaciones faciales del proceso tradicional, ya que en el método virtual se realizan de forma automática por la plataforma propuesta.

En relación al desempeño entre médicos expertos y novatos, los resultados revelan que el tiempo dedicado para efectuar el análisis facial por médicos novatos es 23min mayor al empleado por expertos. Sin embargo, la diferencia en el tiempo dedicado en realizar el análisis facial empleando el enfoque virtual entre expertos y novatos se reduce a 2.3min. El aumento en el desempeño en el proceso de análisis facial que ofrece el método virtual se evidencia de forma independiente entre novatos y expertos al obtener un índice de desempeño de 8.18 y 6.87, respectivamente.

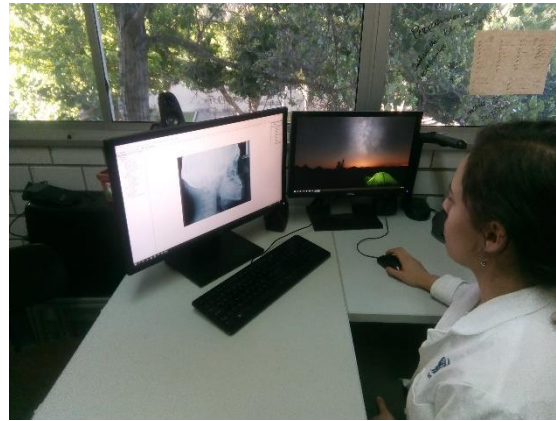
Los resultados anteriores demuestran que el módulo de análisis clínico facial integrado en la plataforma OSSys v2.0 es capaz generar resultados comparables a los obtenidos por el método tradicional. Por lo anterior, se valida el método virtual de análisis facial como una herramienta virtual de planeación ortognática. Además, se comprueba que la herramienta virtual de análisis facial incrementa el desempeño del proceso de análisis al reducir el tiempo dedicado al análisis facial por el cirujano.

#### **6.4.2 Análisis cefalométrico**

El análisis cefalométrico se realizó utilizando la metodología de Ricketts y los métodos tradicional y virtual en la plataforma OSSys v2.0. La Figura 6.5 muestra un participante ejecutando el análisis de forma tradicional y de forma virtual. Los resultados cefalométricos obtenidos se resumen en la Tabla 6.3 y la Figura 6.6 muestra el reporte de análisis cefalométrico generado por la plataforma propuesta.



(a)



(b)

Figura 6.5 Proceso de análisis cefalométrico: a) método tradicional, b) método virtual empleando OSSys v2.0.

Tabla 6.3 Resultados del proceso de cefalometría empleando los métodos tradicional y virtual.

	Novatos		Expertos	
	Tradicional	Virtual	Tradicional	Virtual
Perfil facial	Cóncavo	Cóncavo	Cóncavo	Cóncavo
Sobremordida en milímetros (D.E)	-3.00 (1)	-3.24 (0.5)	-3.00 (0.72)	-3.62 (0.4)
Relación molar	Clase III	Clase III	Clase III	Clase III
Diagnóstico y tratamiento propuesto	Bimaxilar (LeFort I BSSO)	LeFort I BSSO	Bimaxilar (LeFort I BSSO)	LeFort BSSO
Tiempo medio para efectuar el proceso de análisis cefalométrico en minutos (D.E)	117 (5.2)	7.5 (1.26)	43 (4.02)	8.2 (3.37)
Índice de desempeño	15.6		5.24	
Índice de desempeño global, sin diferenciar entre novatos y expertos	10.19			

D.E: Desviación estándar.

## Ossys v2.0

Ricketts Cephalometric Analysis Results								
Measure	Measure Name	Patient	Unit	Standar	Unit	SD	Unit	Diagnosis
<u>Teething analysis</u>								
U6-L6	Molar relationship	-5.56	mm	-3	mm	3	mm	Class III patient
Isi-llj	Overjet	1.969	mm	2.5	mm	2.5	mm	
Isi-llj	Overbite	3.57	mm	2.5	mm	2.5	mm	Class III patient
llj-Pocc	Inferius incisive to occlusal plane	0.429	mm	1.25	mm	2	mm	
U3-L3	Canine relationship	-0.52	mm	-2	mm	3	mm	
Isi-Isa/llj-lia	Intercisal angle	121.7	°	130	°	6	°	Proclinated incisive
<u>Skeletal analysis</u>								
A-(N-Pg)	Convexity	0.837	mm	0	mm	2	mm	
Ans-XlPm	Facial height	53.3	°	47	°	4	°	Increased midfacial angle, vertical pattern growth
<u>Dentoskeletal analysis</u>								
U6-Pt	Upper malar position	23.47	mm	23	mm	3	mm	
llj-(A-Pg)	Inferius incisive protrusion	6.544	mm	1	mm	2.3	mm	Increased
Isi-(A-Pg)	Superius incisive protrusion	8.618	mm	3.5	mm	2.3	mm	Increased
Isi-Isa/A-Pg	Upper incisive angle	31.84	°	28	°	4	°	
llj-lia/A-Pg	Lower incisive angle	26.51	°	22	°	4	°	Class III patient
Xl-Pocc	Occlusal plane to Xl	5.12	mm	0	mm	5	mm	Short ramus mandible and dolicocephalic patient
<u>Esthetical analysis</u>								
Li-(Pn-Pog)	Labrale protrusion	1.407	mm	-2	mm	2	mm	Protruded inferius labrale
Ans-St	Labrale superius lenght	25.36	mm	24	mm	2	mm	
St-Pocc	Occlusal plane to labrale superius	6.181	mm	-2.5	mm	1	mm	Increased
<u>Craniofacial analysis</u>								
Po-Or/N-Pg	Facial depth	83.3	°	87	°	3	°	Retruded mandible
Ba-Na/Pt-Gnl	Facial axis	88.65	°	90	°	3.5	°	
Go-Me/Po-Or	Mandibular plane angle	30.14	°	26	°	4.5	°	
N-Cf-A	Maxillar height	65.03	°	53	°	3	°	Increased nasomaxillary growth
Po-Or/N-A	Maxillar depth	263.8	°	90	°	3	°	Retruded maxilla
Po-Or/Ans-Pns	Palatine plane angle	0.378	°	1	°	3.5	°	
<u>Inner structure analysis</u>								
Ba-N/Po-Or	Cranial deflection	22.37	°	27	°	3	°	Flat cranial base
Cc-N	Anterior cranial length	54.34	mm	55	mm	2.5	mm	
Cd-Xl/Xl-Pm	Mandible arc	-29.3	°	26	°	4	°	Down and backward menthon rotation
Xl-Pm	Mandible body length	64.73	mm	65	mm	2.7	mm	
Po-Pt	Porion position	40.42	mm	76	mm	2.2	mm	Skeletall class III
GoI-Cf	Posterior facial height	61.88	mm	76	mm	3.3	mm	Diminished mandible ramus growth, dolicocephalic patient
Po-Or/Cf-Xl	Mandible ramus position	72.45	°	76	°	3	°	Class III malocclusion

Figura 6.6 Reporte de resultados de análisis cefalométrico de Ricketts generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

De acuerdo con los resultados se observa que se ha obtenido un mismo diagnóstico y tratamiento; es decir, el paciente requiere un procedimiento quirúrgico bimaxilar LeFort I y la osteotomía de corte sagital bilateral (BSSO). El diagnóstico clínico propuesto por el sistema virtual coincide con el diagnóstico realizado por los cirujanos expertos empleando el enfoque tradicional. Sin embargo, en el valor de las métricas de la cefalometría de Ricketts se observa una diferencia. La diferencia existente se debe a la habilidad del cirujano en la identificación de los puntos anatómicos cefalométricos y a la diferencia en el proceso de medición de las relaciones cefalométricas entre el proceso tradicional y virtual de análisis cefalométrico. Diversos autores han encontrado en pruebas de repetibilidad interpersonal de análisis cefalométrico, que a pesar de que exista una

diferencia estadísticamente significativa de hasta 2.0mm clínicamente es un valor aceptable siempre y cuando se obtenga el mismo diagnóstico cefalométrico [228, 229]. Por lo tanto, la diferencia que existe entre los resultados de análisis cefalométrico empleando el enfoque virtual y tradicional para el caso de estudio no resulta ser clínicamente significativa, ya que el diagnóstico y tratamiento sugerido es igual.

Por otra parte, el análisis cefalométrico empleando la plataforma virtual-háptica OSSys permite incrementar el desempeño de la etapa del análisis cefalométrico al reducir de forma general un 90.18% el tiempo el tiempo dedicado en la fase de análisis cefalométrico de forma tradicional, sin discriminar entre novatos y expertos. La reducción en tiempo mostrada se evidencia al obtener un índice de desempeño general del 10.19, lo que representa que el uso del enfoque virtual de análisis cefalométrico permite un desempeño más de 10 veces mayor que el desempeño del proceso tradicional de análisis. También es evidente que el tiempo invertido por médicos novatos al utilizar el enfoque tradicional, es mayor al doble del tiempo requerido por los expertos. Sin embargo, esta diferencia se elimina en el enfoque virtual.

A partir de los resultados obtenidos de la evaluación del caso de estudio, se comprueba que el módulo de cefalometría virtual implementado en OSSys v2.0 es capaz de generar resultados cefalométricos comparables al enfoque tradicional de análisis. Además, el uso del módulo de cefalometría virtual incrementa el desempeño de la etapa de análisis cefalométrico, comparado con el proceso tradicional de cefalometría que se involucra en el proceso de planeación de OGS.

### 6.4.3 Cirugía de modelos

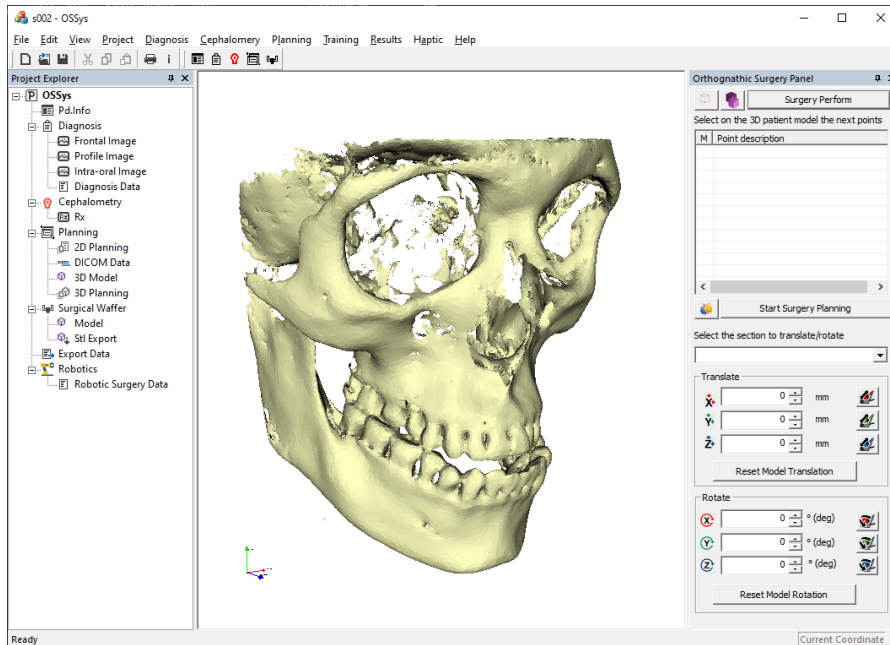
En la etapa de cirugía de modelos tradicional cada cirujano participante generó los modelos de yeso dentales del paciente de forma conjunta en una misma sesión. Cada modelo de yeso fue montado en un articulador para simular la problemática de desalineación maxilar del paciente, Figura 6.7. Sobre cada modelo se indicaron líneas de referencia para cuantificar el desplazamiento maxilar requerido por el paciente. Posteriormente los modelos de yeso fueron cortados y reposicionados manualmente por cada médico de forma independiente, hasta obtener la oclusión maxilar idónea que corrige la problemática de desalineación maxilar.



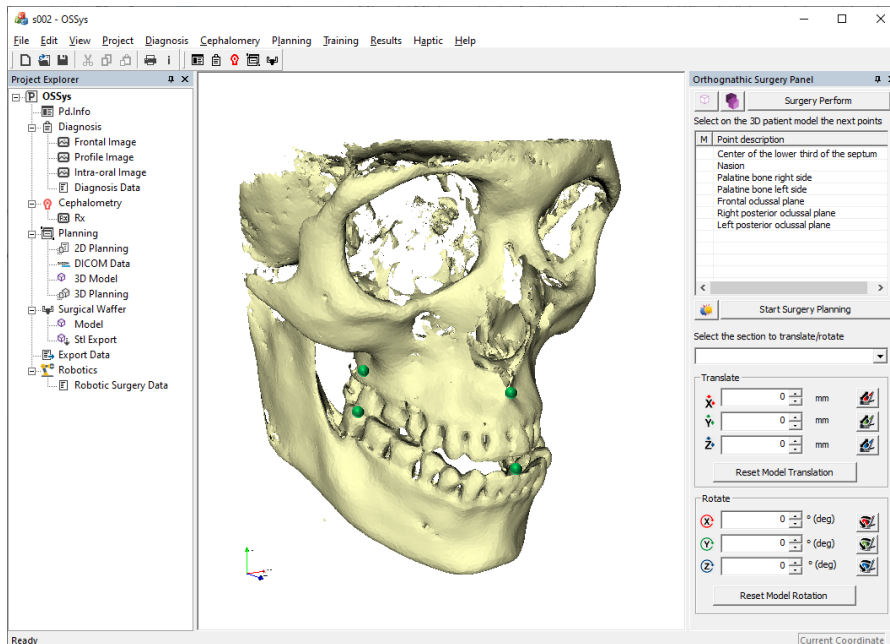
*Figura 6.7 Modelo de yeso de las arcadas dentales del paciente montado sobre articulador maxilar.*

En el caso de la cirugía de modelos virtual, cada médico empleó el modelo digital del paciente en la plataforma OSSys v2.0. Los médicos recurrieron al dispositivo háptico para percibir táctilmente la anatomía ósea del cráneo del paciente, y definir los puntos virtuales para la generación de los planos de corte. Posterior a la identificación de los puntos virtuales, el sistema generó de forma automática el segmentado del modelo virtual. Una vez segmentado el modelo del paciente el médico efectuó el reposicionamiento maxilar con la ayuda del

dispositivo háptico. Figura 6.8 muestra imágenes de la secuencia de la cirugía de modelos virtual empleando OSSys v2.0. Los resultados obtenidos de la cirugía de modelos empleando el enfoque tradicional y virtual se presentan en la Tabla 6.4, y la Figura 6.9 muestra el reporte de reposicionamiento maxilar generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0

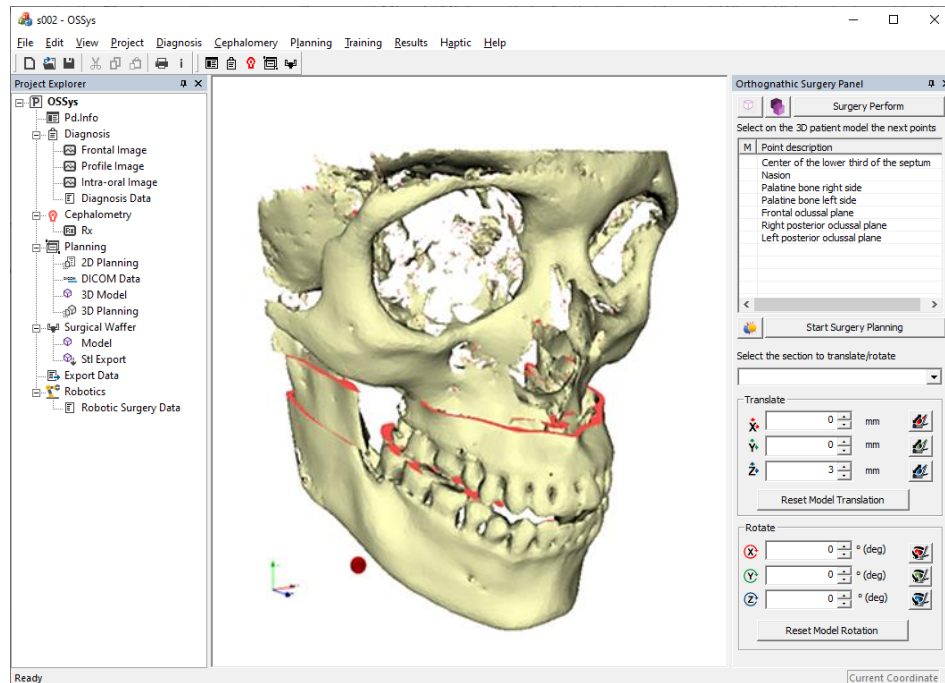


(a)



(b)

Figura 6.8 Proceso de reposicionamiento maxilar para el caso de estudio, empleando la plataforma OSSys v2.0; (a) modelo 3D del paciente renderizado, (b) puntos anatómicos que permiten el seccionado del modelo 3D del paciente seleccionados. (c) modelo del paciente.



(c)

Figura 6.8 Proceso de reposicionamiento maxilar para el caso de estudio, empleando la plataforma OSSys v2.0; (a) modelo 3D del paciente renderizado, (b) puntos anatómicos que permiten el seccionado del modelo 3D del paciente seleccionados. (c) modelo del paciente, (continuación).

Tabla 6.4 Resultados del proceso de cirugía de modelos utilizando los métodos tradicional y virtual.

	Novatos		Expertos	
	Tradicional	Virtual	Tradicional	Virtual
Tipo de cirugía ortognática	LeFort I BSSO	LeFort I BSSO	LeFort I BSSO	LeFort I BSSO
Proyección maxilar en milímetros (D.E)	9.1 (0.7)	10.3 (0.65)	9.5 (0.4)	10.42 (0.21)
Proyección mandibular en milímetros (D.E)	2.3 (0.6)	3.1 (0.48)	2.7 (0.5)	3.03 (0.35)
Tiempo medio para efectuar el proceso de cirugía de modelos en minutos (D.E)	263 (20.51)	15.2* (3.1)	127 (10.2)	9.7* (2.93)
Índice de desempeño	17.30		13.09	
Índice de desempeño global, sin diferenciar entre novatos y expertos	15.96			

D.E: Desviación estándar. \* despreciando el tiempo de procesamiento computacional en el renderizado gráfico, físico y háptico.

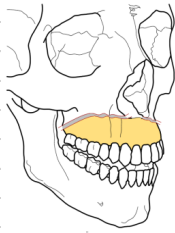
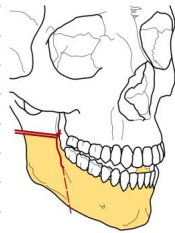
<b>OSSys v2.0</b>					
<b>Surgery Planning</b>					
<b>LeFort I</b>					
	Maxilla Setfront (+)	10.39	mm		
	Maxilla Setback	0.00	mm		
	Maxilla Set-right (+)	0.00	mm		
	Maxilla Set-left (-)	0.00	mm		
	Maxilla proclinated	0.00	deg		
	Mxilla retroclinated	0.00	deg		
<b>BSSO</b>					
	Mandible Setfront (+)	3.12	mm		
	Mandible Setback	0.00	mm		
	Mandible Set-right (+)	0.00	mm		
	Mandible Set-left (-)	0.00	mm		
	Mandible proclinated	0.00	deg		
	Mandible retroclinate	0.00	deg		

Figura 6.9 Reporte de reposicionamiento maxilar generado por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

A partir de los resultados del proceso de cirugía de modelos obtenidos, se identifica que el desplazamiento maxilar requerido por el paciente y definido por médicos mediante ambos enfoques es muy similar. La diferencia que se observa se asume al proceso de corte y reposicionamiento maxilar en el enfoque tradicional, el cual se efectúa empleando herramientas manuales de corte y cera. Sin embargo, al igual que en el análisis cefalométrico no existe una diferencia mayor a 2.0mm entre ambos enfoques, lo cual significa que ambos resultados son clínicamente válidos.

Los resultados de evaluación del módulo de cirugía de modelos que implementa OSSys v2.0 muestran que el enfoque virtual de cirugía de modelos ofrece en términos de tiempo un mejor desempeño que el enfoque tradicional de cirugía de modelos. El incremento en el desempeño que ofrece el enfoque virtual de cirugía de modelos se identifica al reducir un 87.3% el tiempo de dedicación en la etapa de cirugía de modelos tradicional y un índice de desempeño de 15.96, ambos valores calculados despreciando la diferencia de grupos entre novatos y expertos.

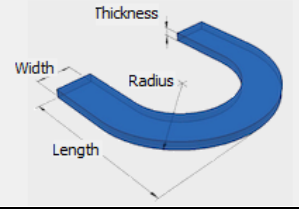
El incremento en el desempeño que ofrece OSSys v2.0 en la generación del proceso de cirugía de modelos, contra el proceso tradicional se aprecia en el grupo de novatos y expertos al tener un índice de desempeño de 17.3 y 13.09 respectivamente. El incremento en desempeño se da en términos de tiempo y se debe a que en el proceso virtual de cirugía de modelos solo se requiere una fracción del tiempo requerido en el método tradicional (5.8% para cirujanos novatos y 7.6% para cirujanos expertos). Esta reducción de tiempo es resultado a que en el método virtual se eliminan las tareas de fabricación de los modelos maxilares de yeso, el montaje de los modelos en el articulador dental, la señalización de líneas de referencia, el segmentado manual de los modelos y la cuantificación manual del desplazamiento de los modelos. Además, los errores asociados a estas tareas se eliminan al no ser efectuadas por el cirujano de forma manual, sino de manera virtual asistida por computadora.



#### 6.4.4 Generación de férula quirúrgica

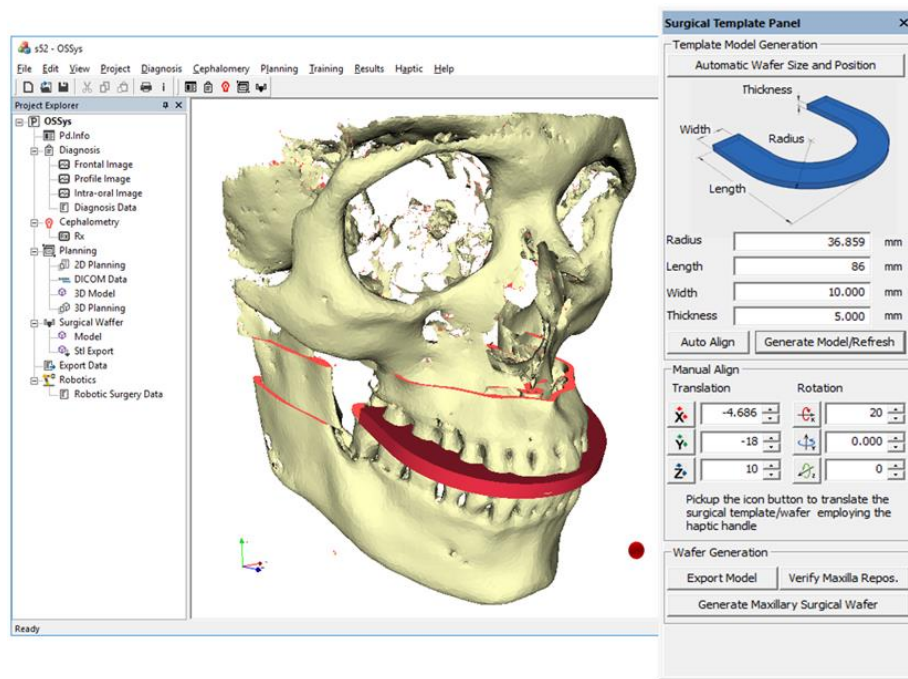
Una vez habiendo determinado el reposicionamiento maxilar requerido por el paciente en la etapa de cirugía de modelos, se prosiguió con la generación de la férula quirúrgica empleando los enfoques tradicional y virtual. Mediante el método tradicional cada médico moldeó manualmente resina acrílica sobre los modelos de yeso reposicionados. En el caso del método virtual en OSSys v2.0, cada médico generó la férula a partir de la oclusión corregida del paciente de forma virtual. Los parámetros de diseño empleados en el enfoque virtual y el tiempo medio dedicado por el especialista en generar la férula quirúrgica de forma tradicional y virtual se muestran en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5 Resultados de la evaluación del proceso de generación de férula quirúrgica utilizando los métodos tradicional y virtual.

	Novatos		Expertos	
	Tradicional	Virtual	Tradicional	Virtual
				
Espesor en milímetros	5.3	3.0	-	3.0
Radio en milímetros (D.E)	38.5	32.0 (2.3)	-	31.0 (1.5)
Longitud en milímetros (D.E)	60.0	57.0 (3.01)	-	59.0 (1.24)
Width in mm (D.E)	17.5	17.0 (1.2)	-	15.0 (0.81)
Tiempo medio total del proceso de generación de férula quirúrgica en minutos (D.E)	70* (5.2)	-	43* (4.02)	-
Tiempo medio invertido por el cirujano en minutos en el diseño de la férula quirúrgica (D.E)	-	7.5* (1.26)	-	8.2* (3.37)
Tiempo medio de fabricación por manufactura aditiva	-	45	-	45
Índice de desempeño	9.33*		5.24*	
Índice de desempeño global, sin diferenciar entre novatos y expertos	7.19			

D.E: Desviación estándar, \*el valor no considera el tiempo de procesamiento computacional y/o el tiempo de espera propio del proceso como lo puede ser: el curado de la resina, secado, etc.

El tiempo para generar la plantilla quirúrgica mediante el enfoque virtual integra el tiempo invertido por el cirujano en el diseño asistido de la plantilla y el tiempo de fabricación empleando tecnología de manufactura aditiva (AM). El sistema AM utilizado es un equipo FDM modelo Creator Pro de FlashForge®, el cual utiliza PLA como material plástico. El resultado obtenido de férula quirúrgica se muestra en la Figura 6.10.



(a)



(b)



(c)

Figura 6.10 Plantilla quirúrgica: a) férula quirúrgica virtual generada en OSSys, b) férula fabricada empleando manufactura aditiva, c) férula quirúrgica generada de forma tradicional.

A partir de los resultados obtenidos del tiempo de generación de la férula quirúrgica, se observa que los cirujanos novatos emplean cerca del doble de tiempo que el empleado por expertos en la generación de la plantilla quirúrgica por el método tradicional. Por el método tradicional, los cirujanos invierten tiempo en las tareas preparación de la resina quirúrgica que conforma la férula, el moldeo de la resina sobre los modelos dentales y, el desmontaje y postprocesamiento de la férula. Sin embargo, en el enfoque virtual el tiempo invertido por los especialistas se enfoca en el diseño virtual de la plantilla quirúrgica, lo que permite reducir el tiempo que invierte el especialista en esta etapa del proceso de planeación hasta un 86%.

La reducción en tiempo que ofrece el enfoque virtual de generación de plantilla quirúrgica permite que el tiempo desempeño entre médicos novatos y expertos sea similar con una diferencia de 0.7min. El incremento en el desempeño se identifica mediante el índice de desempeño obtenido, el cual corresponde a 9.33 para médicos novatos y a 5.24 para expertos. Los índices de desempeño obtenidos indican proporcionalmente la

reducción en tiempo que invierte el especialista en el proceso de generar la plantilla quirúrgica en comparación con el enfoque tradicional. Por lo tanto, se comprueba que el módulo de generación virtual de la férula quirúrgica implementado en OSSys v2.0 permite incrementar el desempeño de la generación tradicional de la plantilla quirúrgica.

#### 6.4.5 Información quirúrgica

Una de las principales características de la plataforma virtual-háptica propuesta OSSys v2.0 es la extracción del plan quirúrgico. El plan quirúrgico tradicional incluye la información médica del paciente, los resultados del análisis facial y cefalométrico, el diagnóstico y tratamiento sugerido, y el informe de reposicionamiento maxilar en conjunto con la plantilla quirúrgica.

La plataforma OSSys v2.0, extrae de forma automática la información quirúrgica generada en cada etapa del proceso de planeación de OGS. En el Apéndice 4 se muestra un plan quirúrgico correspondiente al caso de estudio, generado por la plataforma para la planeación de cirugías ortognáticas propuesta.

#### 6.4.6 Desempeño en tiempo

Los resultados de desempeño en términos del tiempo requerido en cada una de las etapas del proceso de planeación de la cirugía ortognática se muestran en la Tabla 6.6. En esta tabla se muestran los valores tanto para el método tradicional como para el método virtual en OSSys. A partir de estos resultados se demuestra que el enfoque virtual propuesto permite una reducción significativa del tiempo de planeación de la cirugía ortognática. La reducción total del tiempo de planeación obtenida con el método virtual es del 90% del tiempo de planeación ortognática tradicional. Por lo cual se comprueba que el método virtual de planeación ortognática en OSSys incrementa el desempeño del proceso de planeación tradicional. Además, el método virtual de planeación permite reducir la diferencia que existe en el tiempo de planeación entre médicos expertos y novatos.

*Tabla 6.6 Tiempo de ejecución para cada etapa del proceso planeación quirúrgica ortognática mediante el método tradicional y el método virtual.*

Etapas de planeación quirúrgica ortognática	Novatos		Expertos	
	Tradicional	Virtual	Tradicional	Virtual
Análisis clínico facial (D.E)	45 (5.24)	5.5 (2.07)	22 (4.73)	3.2 (1.04)
Análisis cefalométrico (D.E)	117 (10.37)	10.2 (3.06)	75.2 (7.19)	5.2 (2.34)
Cirugía de modelos (D.E)	263 (20.51)	15.2 (3.1)	127 (10.2)	9.7 (2.93)
Generación de férula quirúrgica (D.E)	70 (5.2)	7.5 (1.26)	43 (4.02)	8.2 (3.37)
<b>Total</b>	<b>495 (10.33)</b>	<b>38.4 (2.37)</b>	<b>267 (6.53)</b>	<b>26.3 (2.42)</b>

D.E: Desviación estándar.

### 6.5 Evaluación informática del sistema

Con la finalidad de evaluar el desempeño informático de la plataforma propuesta OSSys v2.0 durante el proceso de planeación del caso de estudio, se realizó un análisis de rendimiento del sistema. El análisis del rendimiento de OSSys v2.0 se efectuó midiendo los recursos informáticos empleados en las tareas que demandan un mayor costo computacional, identificadas en el capítulo 3. Las tareas que demandan un mayor costo computacional corresponden a las asociadas a la manipulación del modelo 3D del paciente y son: la carga y renderizado gráfico, renderizado físico y háptico; así como el seccionado del modelo del paciente, y la generación del grabado oclusal.

El análisis del rendimiento informático de OSSys v2.0, se realizó en un equipo de cómputo con un procesador Intel® Core i5@3.10GHz, 8GB de memoria RAM, tarjeta de video NVIDIA® GeForce GTX745 de 4GB y sistema operativo Windows 10 desactivandose la opción de arranque multinúcleo. Los resultados de evaluación del rendimiento informático de OSSys v2.0 se muestran en la Tabla 6.7.

Tabla 6.7 Recursos informáticos empleados por la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0, en las tareas identificadas con mayor demanda computacional.

Tarea ejecutada	Tiempo promedio de ejecución en milisegundos	Porcentaje promedio de uso del procesador	Cantidad de memoria empleada (MB)
Carga y renderizado gráfico, físico y háptico del modelo virtual del paciente.	252024 (4.2 min)	64.8 (2.01 GHz)	1676.7
Seccionado y renderizado, gráfico, físico y háptico de los segmentos virtuales.	438 000 (7.3 min)	71.2 (2.21 GHz)	1690.9
Generación del grabado oclusal.	936608 (15.6 min)	59.3 (1.84 GHz)	863.2

A partir de los resultados obtenidos de la evaluación del rendimiento informático de OSSys v2.0, se identifica que el proceso de generación del graba oclusal es la tarea más tiempo demora, a pesar de no ser la tarea que más recursos del procesador demanda. La tarea con un mayor costo computacional en términos de procesamiento y demanda de memoria RAM es el seccionado y renderizado (gráfico, físico y háptico) de los segmentos virtuales.

Con los resultados de rendimiento informático obtenidos, se comprueban los requerimientos de cómputo mínimos establecidos en el capítulo 3 para ejecutar OSSys v2.0. Estos requisitos computacionales corresponden a un equipo que ofrezca un mínimo de 2.1 GHz de procesamiento y una memoria RAM de 2GB es capaz de ejecutar la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0.

## 6.6 Discusión general

En general, se ha demostrado la funcionalidad de la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0 propuesta como sistema de planeación de la cirugía ortognática. El sistema propuesto integra todas las etapas del proceso de planeación tradicional de OGS de forma virtual y unificada. El sistema es capaz de asistir a los cirujanos desde la etapa de análisis clínico facial hasta la generación de la plantilla quirúrgica, generando de forma automática la información quirúrgica requerida en el quirófano. Adicionalmente, se observa un aumento en el desempeño global del proceso de planeación de OGS al reducir el tiempo invertido por parte del médico. El incremento en el rendimiento se evidencia en cada una de las etapas del proceso de planeación sin afectar la calidad de los resultados.

Además, en el enfoque de planeación virtual se eliminan errores que han sido identificados a actividades del proceso de planeación tradicional que ahora se realizan virtualmente. Entre estos errores se encuentran los asociados a la medición manual de las relaciones óseas y faciales en las etapas de análisis facial y cefalométrico, los errores en la creación manual de los modelos dentales del paciente y su montaje en el articulador, el segmentado y el reposicionamiento manual en la cirugía de modelos, y el moldeado manual de la resina acrílica para la obtención de la férula quirúrgica [167]. La cuantificación de los errores que se identifican en el proceso tradicional de planeación de OGS resulta ser una tarea compleja ya que no existe un valor de referencia contra el cual comparar y depender del resultado quirúrgico final. Sin embargo, en el enfoque virtual de planeación de OGS también se pueden presentar errores, entre los que se identifican los originados a una mala resolución de del modelo tridimensional e imágenes paciente, una reconstrucción errónea del modelo 3D.

Las principales ventajas encontradas en el sistema propuesto de planeación ortognática asistida por la realidad virtual y sistemas hápticos son:

- Cálculo automático de las relaciones faciales y óseas en el análisis facial y cefalométrico.
- Prediagnóstico en los módulos de análisis facial y cefalométrico virtual.

- Interacción y manipulación virtual-háptica del modelo 3D del paciente.
- Capacidad de efectuar la cirugía de modelos de forma digital en un ambiente virtual.
- El diseño asistido por computadora de la plantilla quirúrgica.
- Generación automática de la información quirúrgica relevante.

La incorporación de la tecnología háptica en el sistema de planeación quirúrgica virtual propuesto permite al cirujano la capacidad de manipular libremente los objetos 3D sobre el entorno virtual. Además, el sistema háptico permite al cirujano percibir las características anatómicas del paciente, mediante la retroalimentación táctil. La capacidad de percepción táctil de la anatomía del paciente brinda al cirujano la capacidad de segmentar los modelos dentales, y manipular los fragmentos óseos de una manera más realista.

Por otro lado, la integración de herramientas de diagnóstico virtual permite la generación automática de un prediagnóstico, el cual auxilia al cirujano y reduce la posibilidad de errores de diagnóstico y el procedimiento quirúrgico requerido. Sin embargo, es importante señalar que la herramienta de diagnóstico virtual integrada en la plataforma virtual-háptica OSSys v2.0, no sustituye el juicio profesional del especialista, sino que es una herramienta de asistencia basada en la información reportada en la literatura médica.

Además, la incorporación de herramientas CAD en el sistema OSSys ha permitido el diseño asistido y eficiente de la férula quirúrgica, sin la necesidad de experiencia previa en sistemas CAD por parte del médico.

Finalmente, se puede mencionar que los participantes del proceso de evaluación y los resultados obtenidos validan la usabilidad y funcionalidad de la plataforma virtual-háptica OSSys propuesta. La validación dictamina al sistema OSSys v2.0 como un sistema integral para la planeación de la cirugía ortognática haciendo uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos. Adicionalmente los especialistas participantes han sugerido el uso de la plataforma OSSys v2.0 dentro de la práctica médica en hospitales, así como para fines académicos. Por lo tanto, se validan en su totalidad las hipótesis del proceso de evaluación del sistema para la planeación de cirugías ortognáticas.



## Conclusiones

En este trabajo de tesis doctoral se ha desarrollado y evaluado un sistema para la planeación integral de cirugías ortognáticas (OGS) asistido por la realidad virtual y los sistemas hápticos. El sistema desarrollado, llamado OSSys v2.0 (Ortognathic Surgery System v2.0), se basa en el proceso de planeación ortognática tradicional integrando herramientas que permiten ejecutar cada una de las etapas del proceso de planeación de OGS en un entorno virtual. En otras palabras, se ha logrado la planeación de cirugías ortognáticas de forma virtual, cumpliendo el objetivo general del trabajo de tesis doctoral.

La integración de la realidad virtual, los sistemas hápticos y el comportamiento físico de los objetos en el proceso de planeación de cirugías ortognáticas sirvió como base para el desarrollo e implementación de herramientas que permiten generar de forma integral todas las etapas de planeación de la cirugía ortognática. De esta manera se comprueba la hipótesis del trabajo de investigación doctoral, la cual establece que es posible generar de manera integral y total el proceso de planeación de la cirugía ortognática mediante el uso de la realidad virtual y los sistemas hápticos. Por lo tanto, el sistema propuesto funge como una alternativa para al proceso tradicional de planeación de cirugías ortognáticas, brindando resultados quirúrgicamente válidos y ofreciendo un mayor desempeño en términos de tiempo, en comparación con el enfoque tradicional de planeación quirúrgica. Además, a diferencia de otros sistemas para la planeación de OGS reportados en la literatura que solo se enfocan en etapas específicas del proceso de planeación, el sistema OSSys v2.0 ofrece herramientas que asisten al médico en todas las fases que conforman el plan quirúrgico ortognático, incluyendo el diagnóstico asistido y la inclusión de nuevas tecnologías utilizadas en la ingeniería, tales como herramientas CAD y la manufactura aditiva.

En cada una de las etapas de planeación de la cirugía ortognática se integró la realidad virtual permitiendo al usuario introducir en el entorno virtual la información de la anatomía del paciente (radiografía lateral de cráneo y el modelo 3D del cráneo). Además de implementar los sistemas hápticos en la manipulación de los objetos virtuales (reposicionamiento, selección y seccionado), y obtener la retroalimentación de fuerza producto de la manipulación virtual de los objetos. La integración del comportamiento físico de los objetos virtuales fue implementada en la etapa de cirugía virtual de modelos, permitiendo la detección de colisiones entre los objetos virtuales, además de evitar la sobreposición de los segmentos maxilares seccionados durante su reposicionamiento.

Dentro de las herramientas virtuales incorporadas al proceso de planeación ortognática se encuentra el diagnóstico asistido por computadora y la automatización del proceso de obtención de las relaciones faciales y óseas en las etapas de análisis facial y análisis cefalométrico, respectivamente. En la etapa de cirugía de modelos se desarrollaron herramientas virtuales que permiten el segmentado del modelo 3D del paciente para generar el reposicionamiento maxilar asistido hápticamente y corregir la problemática del paciente ortognático. La inclusión de la realidad virtual en la etapa de generación de la plantilla quirúrgica permitió implementar herramientas CAD con la finalidad de asistir al especialista médico en la generación de la férula quirúrgica y obtener el grabado oclusal de la nueva posición maxilar del paciente. La adición de herramientas CAD en el proceso de generación de férula quirúrgica permitió incorporar tecnologías modernas de manufactura al proceso de planeación de cirugías ortognáticas, como la manufactura aditiva para la fabricación de la plantilla quirúrgica. En cada una de las etapas del proceso virtual de planeación de la cirugía ortognática se implementaron algoritmos que permiten al sistema propuesto extraer de forma automática la información relevante que constituye el plan de la cirugía ortognática.

Los resultados de la evaluación realizada al sistema OSSys mediante un caso de estudio, han demostrado su funcionalidad como herramienta de planeación integral en cada una de las etapas del proceso de planeación de

cirugías ortognáticas, así como herramienta de diagnóstico asistido. La funcionalidad del sistema OSSys también se evidenció al reducir en un 90% el tiempo total requerido por el cirujano para realizar la planeación de la OGS de forma tradicional, y sin afectar la calidad de los resultados obtenidos. Además, los resultados de la evaluación del sistema demuestran la capacidad de reducción de errores de diagnóstico al mostrar una coincidencia en el 99.3% con el diagnóstico emitido por cirujanos expertos.

Los objetivos específicos del proyecto de tesis doctoral se han cumplido de acuerdo a lo siguiente:

1. *Se desarrolló una plataforma virtual-háptica que permite generar e implementar todas las etapas del proceso de planeación quirúrgica ortognática.*
2. *Se integró el comportamiento físico de los objetos al ambiente virtual.*
3. *Se integraron herramientas de ingeniería para la generación de plantillas quirúrgicas.*
4. *Se logró la extracción de información relevante en cada etapa del proceso de planeación de OGS.*
5. *Se generaron de forma automática los planes quirúrgicos ortognáticos.*
6. *Se evaluaron y compararon los procesos de planeación quirúrgico tradicional y virtual-háptico, observándose una mejora significativa en términos de tiempo y reducción de errores de diagnóstico por parte del enfoque virtual de planeación.*

Además, se identificaron las ventajas que ofrece el enfoque de planeación virtual de OGS en comparación con el proceso tradicional de planeación. Las ventajas observadas son las siguientes:

- Se elimina la intervención del cirujano en las tareas de medición y cálculo manual de las relaciones óseas y faciales del paciente.
- Se elimina el proceso de captura y generación de los modelos de yeso de las arcadas dentales, así como el montaje de los modelos sobre el articulador maxilar.
- Se elimina el proceso de moldeo manual de resina acrílica para la generación de la férula quirúrgica, transfiriéndose el proceso a tecnologías modernas de fabricación como la manufactura aditiva y no al médico como ocurre tradicionalmente.
- Se incrementa el desempeño en términos de tiempo del proceso de planeación quirúrgica, obteniéndose resultados clínicamente válidos.
- Se reducen errores de diagnóstico ortognático generados por médicos novatos.
- Se elimina el proceso de recolección de información quirúrgica de cada etapa del proceso de planeación.

Por lo tanto, el desarrollo del sistema propuesto en el trabajo de investigación representa una alternativa para al proceso tradicional de planeación de la cirugía ortognática, brindando resultados quirúrgicamente válidos y ofreciendo un mayor desempeño en términos de tiempo, en comparación con el enfoque tradicional de planeación quirúrgica. Además, a diferencia de otros sistemas para la planeación de OGS reportados en la literatura que solo se enfocan en etapas específicas del proceso de planeación, el sistema OSSys v2.0 ofrece herramientas que asisten al médico en todas las fases que conforman el plan quirúrgico ortognático, incluyendo el diagnóstico asistido y la inclusión de nuevas tecnologías empleadas en la ingeniería como herramientas CAD y la manufactura aditiva.



## **Contribuciones de la investigación**

El desarrollo del trabajo de investigación permitió lograr las siguientes contribuciones científicas y tecnológicas:

### **a) Sistema para la planeación integral de cirugías ortognáticas**

Se logró la virtualización del proceso de planeación de cirugías ortognáticas mediante la integración de tecnologías de realidad virtual y sistemas hápticos. Se desarrolló el sistema OSSys v2.0, el cual tiene las siguientes características:

1. Capacidad de efectuar de forma virtual todas las etapas del proceso de planeación quirúrgica ortognática.
2. Interacción intuitiva con el usuario en cada uno de los módulos de planeación virtual de la cirugía ortognática.
3. Diagnóstico asistido en las etapas de análisis facial y análisis cefalométrico virtual.
4. Retroalimentación háptica, segmentado de los objetos virtuales y detección activa de colisiones durante el reposicionamiento maxilar en la etapa de cirugía virtual de modelos.
5. Diseño asistido del modelo virtual de férula quirúrgica.
6. Generación automática del reporte de planeación quirúrgica en formato XLS, el cual incluye la información quirúrgica generada de cada etapa del proceso de planeación de forma conjunta.

### **b) Integración de los sistemas hápticos, la realidad virtual y la detección de colisiones entre los objetos virtuales en la planeación quirúrgica**

Se logró la integración de los sistemas hápticos dentro del sistema para la planeación virtual de cirugías ortognáticas. El uso de los sistemas hápticos brinda al especialista la capacidad de manipular libremente mediante el sentido del tacto la anatomía tridimensional del paciente.

### **c) Generación e implementación de algoritmos de diagnóstico asistido por computadora**

Los algoritmos de diagnóstico asistido se desarrollaron e implementaron en OSSys para asistir al cirujano en las etapas de análisis facial y análisis cefalométrico del paciente. Se logró automatizar el proceso de diagnóstico ortognático a partir de los resultados obtenidos de forma automática en las etapas de análisis facial y análisis cefalométrico. De acuerdo con los resultados obtenidos tras la evaluación efectuada, se comprobó la asertividad y precisión de la herramienta de diagnóstico. Conjuntamente, la evaluación reveló que el diagnóstico asistido permite la reducción de posibles errores de diagnóstico a médicos novatos (con menos de 5 años de experiencia) y a cirujanos expertos corroborar su análisis médico.

### **d) Segmentado virtual de objetos tridimensionales**

La capacidad de segmentado de los modelos virtuales incorporada en la plataforma OSSys v2.0 en conjunto con la implementación de los sistemas hápticos permitió la generación de la cirugía de modelos en el entorno virtual. La cirugía de modelos es efectuada a partir del modelo tridimensional del paciente, obtenido por la tomografía computarizada o la resonancia magnética. La capacidad de segmentado no solo resulta útil para simular el reposicionamiento maxilar, sino para simular todo aquel procedimiento que involucre el corte y reposicionamiento. Por lo tanto, esta funcionalidad puede ser empleada en futuras aplicaciones que requieran seccionar modelos tridimensionales.

### **e) Integración de herramientas de ingeniería en la planeación quirúrgica**

El sistema propuesto integra herramientas CAD para asistir al especialista en el proceso de diseño de la férula, sin la necesidad que el cirujano tenga un conocimiento previo en el uso de los sistemas CAD. Esta funcionalidad

se logró empleando modelos de férula paramétricos, en los cuales el usuario tiene la capacidad de modificar sus dimensiones y posición para generar el grabado oclusal.

#### **f) Mejora del proceso de planeación quirúrgica ortognática**

Por medio del sistema OSSys desarrollado se logró reducir en un 90% el tiempo invertido por el cirujano para la planeación de OGS. Así mismo, mediante el uso de la realidad virtual se ha eliminado la necesidad de que el especialista emplee la información médica tradicional del paciente como lo son la radiografía y los modelos dentales, ya que estos son substituidos por la radiografía digital y el modelo anatómico 3D del paciente, generados a partir de la tomografía computarizada. En conjunto con la realidad virtual, la inclusión de los sistemas hápticos en el proceso de planeación de OGS proporciona al cirujano el sentido del tacto en el ambiente virtual donde se desarrolla el proceso de planeación quirúrgica. De acuerdo con lo reportado en la literatura, solo algunos sistemas incorporan el sentido del tacto en la planeación de OGS, esta característica asiste al cirujano en el proceso de reposicionamiento maxilar y en el proceso de exploración táctil de la anatomía del paciente mediante la retroalimentación de fuerza. En contraste con otros sistemas orientados a la planeación virtual de OGS, en el presente trabajo de investigación se logró incorporar el comportamiento físico de los objetos virtuales en la planeación quirúrgica ortognática; contribuyendo al establecimiento de la nueva posición maxilar considerando la anatomía ósea circundante para evitar la sobre-posición maxilar.

#### **Trabajo futuro**

Con el propósito de continuar con el trabajo de investigación e incrementar la generación de conocimiento científico y desarrollo tecnológico, se identifican las siguientes actividades como trabajo futuro:

1. Realizar una evaluación de usabilidad del sistema OSSys como producto de software, con el propósito de obtener retroalimentación de los usuarios para la mejora del sistema informático.
2. Analizar con más detalle el desempeño de la cirugía virtual de modelos y generación de plantilla quirúrgica, con el propósito de evaluar sus capacidades y limitantes en relación al procedimiento tradicional manual, y detectar áreas de mejora u optimización.
3. Incrementar la evaluación de casos de estudio de planeación de cirugías ortognáticas empleando la plataforma virtual-háptica propuesta con la finalidad de evaluar su funcionalidad como herramienta de planeación ortognática.
4. Desarrollar un caso clínico de cirugía ortognática en el cual se comparen los resultados de la planeación tradicional y la planeación virtual de un paciente con base en los resultados postquirúrgicos. El objetivo es evaluar el desempeño y fiabilidad del método virtual de planeación propuesto para un caso real de cirugía ortognática.
5. Desarrollar algoritmos que asistan al especialista en el proceso de reposicionamiento maxilar a partir del diagnóstico cefalométrico propuesto.
6. Desarrollar algoritmos que permitan generar una aproximación del resultado quirúrgico sobre los tejidos blandos.
7. Adaptar e incorporar a la plataforma OSSys un módulo de entrenamiento virtual-háptico para el segmentado óseo maxilar, con el objetivo de permitir al cirujano mejorar sus habilidades psicomotrices asociadas al proceso de segmentado maxilar.
8. Implementar herramientas de realidad aumentada para la transferencia del plan quirúrgico al paciente durante la cirugía real.

## Referencias

- [1]. Mani, V., *Surgical correction of facial deformities*. 2010: JP Medical Ltd.
- [2]. Social, I.M.d.S., *Informe al Ejecutivo federal y al Congreso de la Unión sobre la situación financiera y los riesgos del Instituto Mexicano del Seguro Social 2015-2016*. 2016, Instituto Mexicano del Seguro Social Ciudad de México.
- [3]. Posnick, J.C., *Principles and practice of orthognathic surgery*. 2013: Elsevier Health Sciences.
- [4]. Graber, L.W., R.L. Vanarsdall, K.W. Vig, and G.J. Huang, *Orthodontics-e-book: current principles and techniques*. 2016: Elsevier Health Sciences.
- [5]. Miloro, M., G. Ghali, P. Larsen, L.J. Peterson, and P. Waite, *Peterson's principles of oral and maxillofacial surgery*. Vol. 1. 2004: PMPH-USA.
- [6]. Proffit, W.R., H.W. Fields Jr, and D.M. Sarver, *Combined Surgical and Orthodontic Treatment*, in *Contemporary orthodontics*, Elsevier, Editor. 2006, Elsevier Health Sciences.
- [7]. McCormick, S.U. and S.J. Drew, *Virtual model surgery for efficient planning and surgical performance*. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, 2011. **69**(3): p. 638-644.
- [8]. Vázquez-Mata, G., *Realidad virtual y simulación en el entrenamiento de los estudiantes de medicina*. *Educación Médica*, 2008. **11**: p. 29-31.
- [9]. Subhas, G., A. Gupta, and V.K. Mittal, *Necessity for improvement in endoscopy training during surgical residency*. *The American Journal of Surgery*, 2010. **199**(3): p. 331-335.
- [10]. Owen, H., *Early use of simulation in medical education*. *Simulation in healthcare*, 2012. **7**(2): p. 102-116.
- [11]. Burdea, G.C. and P. Coiffet, *Virtual reality technology*. 2003: John Wiley & Sons.
- [12]. Bryson, S., *Virtual reality in scientific visualization*. *Communications of the ACM*, 1996. **39**(5): p. 62-71.
- [13]. Xia, J.J., J. Gateno, and J.F. Teichgraber, *Computer-Aided Surgical Simulation for Orthognathic Surgery*. 2012: p. 604-616.
- [14]. Neumann, P., D. Siebert, A. Schulz, G. Faulkner, M. Krauss, and T. Tolxdorff, *Using virtual reality techniques in maxillofacial surgery planning*. *Virtual Reality*, 1999. **4**(3): p. 213-222.
- [15]. Ruiz, C. and F. Montagut, *Yeison J, Heidenreich E*. Algorithm for virtual modeling of organs by medical images. *Vector*, 2009. **4**: p. 14-26.
- [16]. Agus, M.G., Andrea; Gobetti, Enrico; Gianluigui, Zanetti; Zorcolo, Antonio. *Adaptive techniques for real-time haptic and visual simulation of bone dissection*. in *IEEE Virtual Reality, 2003. Proceedings*. 2003. Los Angeles, CA, USA.
- [17]. Coles, T.R., D. Meglan, and N.W. John, *The Role of Haptics in Medical Training Simulators: A Survey of the State of the Art*. *IEEE Trans Haptics*, 2011. **4**(1): p. 51-66.
- [18]. Lin, Y., X. Wang, F. Wu, X. Chen, C. Wang, and G. Shen, *Development and validation of a surgical training simulator with haptic feedback for learning bone-sawing skill*. *J Biomed Inform*, 2014. **48**: p. 122-9.
- [19]. Banerjee, P.P. and C.J. Luciano, *Haptic augmented and virtual reality system for simulation of surgical procedures*. 2017, Google Patents.
- [20]. Syed, A.A.D., Xingguang; Gao, Congjun; Wang, xiangtao; Huang, Qiang. *Maxillofacial surgery using virtual force feedback*. in *International Conference on Robotics and Biometrics*. 2011. Phuket, Thailand: IEEE.
- [21]. Olsson, P., F. Nysjo, J.M. Hirsch, and I.B. Carlbom, *A haptics-assisted cranio-maxillofacial surgery planning system for restoring skeletal anatomy in complex trauma cases*. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2013. **8**(6): p. 887-94.
- [22]. Medellin-Castillo, H.I., E.H. Govea-Valladares, C.N. Perez-Guerrero, J. Gil-Valladares, T. Lim, and J.M. Ritchie, *The evaluation of a novel haptic-enabled virtual reality approach for computer-aided cephalometry*. *Comput Methods Programs Biomed*, 2016. **130**: p. 46-53.
- [23]. Ranta, J.F. and W.A. Aviles. *The virtual reality dental training system: simulating dental procedures for the purpose of training dental students using haptics*. in *Proceedings of the fourth PHANTOM users group workshop*. 1999. November.
- [24]. Dangxiao, W., Z. Yuru, H. Jianxia, W. Yong, L. Peijun, C. Yonggang, and Z. Hui, *iDental: A Haptic-Based Dental Simulator and Its Preliminary User Evaluation*. *IEEE Trans Haptics*, 2012. **5**(4): p. 332-43.
- [25]. Hassan, A.H. and H.E.-S. Amin, *Association of orthodontic treatment needs and oral health-related quality of life in young adults*. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2010. **137**(1): p. 42-47.

- [26]. Chapuis, J., P. Ryan, M. Blaeuer, F. Langlotz, W. Hallermann, A. Schramm, and M. Caversaccio, *A new approach for 3D computer-assisted orthognathic surgery—first clinical case*. International Congress Series, 2005. **1281**: p. 1217-1222.
- [27]. Swennen, G.R., W. Mollemans, and F. Schutyser, *Three-dimensional treatment planning of orthognathic surgery in the era of virtual imaging*. J Oral Maxillofac Surg, 2009. **67**(10): p. 2080-92.
- [28]. Kim, B.C., C.E. Lee, W. Park, M.-K. Kim, P. Zhengguo, H.-S. Yu, C.K. Yi, and S.-H. Lee, *Clinical experiences of digital model surgery and the rapid-prototyped wafer for maxillary orthognathic surgery*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 2011. **111**(3): p. 278-285. e1.
- [29]. Gelesko, S., M.R. Markiewicz, K. Weimer, and R.B. Bell, *Computer-aided orthognathic surgery*. Atlas Oral Maxillofac Surg Clin North Am, 2012. **20**(1): p. 107-18.
- [30]. Aboul-Hosn Centenero, S. and F. Hernandez-Alfaro, *3D planning in orthognathic surgery: CAD/CAM surgical splints and prediction of the soft and hard tissues results - our experience in 16 cases*. J Craniomaxillofac Surg, 2012. **40**(2): p. 162-8.
- [31]. Wagner, A., M. Rasse, W. Millesi, and R. Ewers, *Virtual reality for orthognathic surgery: the augmented reality environment concept*. Journal of oral and maxillofacial surgery, 1997. **55**(5): p. 456-462.
- [32]. Bettiga, G., Y. Payan, B. Mollard, A. Boyer, B. Raphaël, and S. Lavallee, *A simulator for maxillofacial surgery integrating 3D cephalometry and orthodontia*. Computer Aided Surgery, 2000. **5**(3): p. 156-165.
- [33]. Gossett, C.B., C.B. Preston, R. Dunford, and J. Lampasso, *Prediction accuracy of computer-assisted surgical visual treatment objectives as compared with conventional visual treatment objectives*. Journal of oral and maxillofacial surgery, 2005. **63**(5): p. 609-617.
- [34]. Kusnoto, B., *Two-dimensional cephalometry and computerized orthognathic surgical treatment planning*. Clinics in plastic surgery, 2007. **34**(3): p. 417-426.
- [35]. Nadjmi, N., W. Mollemans, A. Daelemans, G. Van Hemelen, F. Schutyser, and S. Berge, *Virtual occlusion in planning orthognathic surgical procedures*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2010. **39**(5): p. 457-62.
- [36]. Berg, L.P. and J.M. Vance, *Industry use of virtual reality in product design and manufacturing: a survey*. Virtual Reality, 2017. **21**(1): p. 1-17.
- [37]. Kartiko, I., M. Kavakli, and K. Cheng, *Learning science in a virtual reality application: The impacts of animated-virtual actors' visual complexity*. Computers & Education, 2010. **55**(2): p. 881-891.
- [38]. Stanney, K.M. and K.S. Hale, *Handbook of virtual environments: Design, implementation, and applications*. 2014: CRC Press.
- [39]. Rübel, O., S. Ahern, E.W. Bethel, M.D. Biggin, H. Childs, E. Cormier-Michel, A. DePace, M.B. Eisen, C.C. Fowlkes, and C.G. Geddes, *Coupling visualization and data analysis for knowledge discovery from multi-dimensional scientific data*. Procedia computer science, 2010. **1**(1): p. 1757-1764.
- [40]. Bowman, D.A. and R.P. McMahan, *Virtual reality: how much immersion is enough?* Computer, 2007. **40**(7).
- [41]. Schulze, J.P., H.S. Kim, P. Weber, A. Prudhomme, R.E. Bohn, M. Seracini, and T.A. DeFanti, *Advanced Applications of Virtual Reality*, in *Advances in Computers*. 2011, Elsevier. p. 217-260.
- [42]. Mazuryk, T. and M. Gervautz, *Virtual reality-history, applications, technology and future*. 1996.
- [43]. Gutiérrez, M.A., F. Vexo, and D. Thalmann, *Architecture of Virtual Reality Systems*. Stepping into Virtual Reality, 2008: p. 107-116.
- [44]. Sherman, W.R. and A.B. Craig, *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*. 2002: Elsevier.
- [45]. Shibata, T., *Head mounted display*. Displays, 2002. **23**(1-2): p. 57-64.
- [46]. Muhanna, M.A., *Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions*. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2015. **27**(3): p. 344-361.
- [47]. Székely, G.R.M.S., *Virtual reality in medicine*. BMJ: British Medical Journal, 1999. **319**(7220): p. 1305.
- [48]. Höll, M., M. Oberweger, C. Arth, and V. Lepetit. *Efficient Physics-Based Implementation for Realistic Hand-Object Interaction in Virtual Reality*. in *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*. 2018.
- [49]. Riva, G., *Applications of virtual environments in medicine*. Methods of information in medicine, 2003. **42**(5): p. 524-534.
- [50]. North, M.M. and S.M. North, *A comparative study of sense of presence of traditional virtual reality and immersive environments*. Australasian Journal of Information Systems, 2016. **20**.
- [51]. Sastry, L. and D.R. Boyd, *Virtual environments for engineering applications*. Virtual Reality, 1998. **3**(4): p. 235-244.

- [52]. Mujber, T.S., T. Szecsi, and M.S.J. Hashmi, *Virtual reality applications in manufacturing process simulation*. Journal of Materials Processing Technology, 2004. **155-156**: p. 1834-1838.
- [53]. Hogue, J.R., R.W. Allen, M.K. Hogue, S. Markham, and A. Harmsen. *Teaching Emergency Ejection and Egress Parachuting with Virtual Reality Simulation*. in *39th Annual SAFE Association Symposium*. 2002.
- [54]. Engineering, U. *Virtual Morelity*. 2011; Available from: <https://www.flickr.com/photos/uclengineering/6959205919>.
- [55]. Thurfjell, L., J. McLaughlin, J. Mattsson, and P. Lammertse, *Haptic interaction with virtual objects: the technology and some applications*. Industrial Robot: An International Journal, 2002. **29**(3): p. 210-215.
- [56]. Robles-De-La-Torre, G., *The importance of the sense of touch in virtual and real environments*. Ieee Multimedia, 2006. **13**(3): p. 24-30.
- [57]. Iwata, H., T. Nakagawa, and T. Nakashima, *Force Display for Presentation of Rigidity of Virtual Objects*. JRM, 1992. **4**(1): p. 39-42.
- [58]. Alur, A., P. Shrivastav, and A. Jumde, *Haptic technology: A comprehensive review of its applications and future prospects*. Int. J. Comput. Sci. Inf. Technol, 2014. **5**: p. 6039-6043.
- [59]. Owens, R. and J.M. Taekman, *Virtual reality, haptic simulators, and virtual environments*, in *The comprehensive textbook of healthcare simulation*. 2013, Springer. p. 233-253.
- [60]. Payandeh, S. and N. Azouz. *Finite elements, mass-spring-damper systems and haptic rendering*. in *Computational Intelligence in Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 IEEE International Symposium on*. 2001. IEEE.
- [61]. Sjöberg, H. and O. Ylinenpää, *Collision Detection for Haptic Rendering*. 2009, Umea University, Sweden: Master's Thesis.
- [62]. Livingston, M.A., L.J. Rosenblum, S.J. Julier, D. Brown, Y. Baillot, I. Swan, J.L. Gabbard, and D. Hix, *An augmented reality system for military operations in urban terrain*. 2002, NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC ADVANCED INFORMATION TECHNOLOGY BRANCH.
- [63]. Li, L., M. Zhang, F. Xu, and S. Liu, *ERT-VR: an immersive virtual reality system for emergency rescue training*. Virtual reality, 2005. **8**(3): p. 194-197.
- [64]. Lele, A., *Virtual reality and its military utility*. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2013. **4**(1): p. 17-26.
- [65]. Lee, A.T., *Flight simulation: virtual environments in aviation*. 2017: Routledge.
- [66]. Gonzalez-Badillo, G., H. Medellin-Castillo, T. Lim, J. Ritchie, and S. Garbaya, *The development of a physics and constraint-based haptic virtual assembly system*. Assembly Automation, 2014. **34**(1): p. 41-55.
- [67]. Gallegos-Nieto, E., H.I. Medellín-Castillo, G. González-Badillo, T. Lim, and J. Ritchie, *The analysis and evaluation of the influence of haptic-enabled virtual assembly training on real assembly performance*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. **89**(1-4): p. 581-598.
- [68]. Fernández-Palacios, B.J., D. Morabito, and F. Remondino, *Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions*. Journal of cultural heritage, 2017. **23**: p. 40-48.
- [69]. Marks, S., J.E. Estevez, and A.M. Connor. *Towards the Holodeck: fully immersive virtual reality visualisation of scientific and engineering data*. in *Proceedings of the 29th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand*. 2014. ACM.
- [70]. Song, H., F. Chen, Q. Peng, J. Zhang, and P.J.P.o.t.I.o.M.E. Gu, Part B: Journal of Engineering Manufacture, *Improvement of user experience using virtual reality in open-architecture product design*. 2018. **232**(13): p. 2264-2275.
- [71]. Whyte, J.J.J.o.I.T.i.C., *Industrial applications of virtual reality in architecture and construction*. 2003. **8**(4): p. 43-50.
- [72]. Hendricks, B.K., A.J. Patel, J. Hartman, M.F. Seifert, and A. Cohen-Gadol, *Operative Anatomy of the Human Skull: A Virtual Reality Expedition*. Operative Neurosurgery, 2018. **15**(4): p. 368-377.
- [73]. Xu, X., L. Wang, Z. Li, S. Yao, and X. Fang, *Modeling of submarine initial pipe-laying process and its real-time semi-physical virtual reality system*. Advances in Mechanical Engineering, 2018. **10**(1): p. 1687814017747734.
- [74]. Freina, L., M.J.e. Ott, and S.f. Education, *A Literature Review on Immersive Virtual Reality in Education: State Of The Art and Perspectives*. 2015(1).
- [75]. Merchant, Z., E.T. Goetz, L. Cifuentes, W. Keeney-Kennicutt, and T.J. Davis, *Effectiveness of virtual reality-based instruction on students' learning outcomes in K-12 and higher education: A meta-analysis*. Computers & Education, 2014. **70**: p. 29-40.

- [76]. Jung, T., M.C. tom Dieck, H. Lee, and N. Chung, *Effects of virtual reality and augmented reality on visitor experiences in museum*, in *Information and Communication Technologies in Tourism 2016*. 2016, Springer. p. 621-635.
- [77]. Mateer, J., *Directing for Cinematic Virtual Reality: how the traditional film director's craft applies to immersive environments and notions of presence*. Journal of Media Practice, 2017. **18**(1): p. 14-25.
- [78]. MacQuarrie, A. and A. Steed. *Cinematic virtual reality: Evaluating the effect of display type on the viewing experience for panoramic video*. in *Virtual Reality (VR), 2017 IEEE*. 2017. IEEE.
- [79]. Kramme, R., K.-P. Hoffmann, and R.S. Pozos, *Springer handbook of medical technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
- [80]. Hanna, L., *Simulated surgery: the virtual reality of surgical training*. Surgery-Oxford International Edition, 2010. **28**(9): p. 463-468.
- [81]. Govea-Valladares, E., H. Medellín-Castillo, T. Lim, B. Khambay, M. Rodríguez-Florido, and J. Ballesteros, *Development of a Virtual Simulator for Planning Mandible Osteotomies in Orthognathic Surgeries*. Revista Mexicana de Ingeniería Biomédica, 2012. **33**(2).
- [82]. Girod, S., E. Keeve, and B. Girod, *Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and visualization*. International journal of oral and maxillofacial surgery, 1995. **24**(1): p. 120-125.
- [83]. Palter, V.N. and T.P. Grantcharov, *Virtual reality in surgical skills training*. Surgical Clinics, 2010. **90**(3): p. 605-617.
- [84]. Lohfeld, S., P. McHugh, D. Serban, D. Boyle, G. O'Donnell, and N. Peckitt, *Engineering Assisted Surgery™: A route for digital design and manufacturing of customised maxillofacial implants*. Journal of Materials Processing Technology, 2007. **183**(2-3): p. 333-338.
- [85]. Swennen, G.R. and M. Gaboury, *3D Virtual Treatment Planning Transfer in the Operation Theatre*, in *3D Virtual Treatment Planning of Orthognathic Surgery*. 2017, Springer. p. 279-328.
- [86]. Satava, R.M. and H.H. Sherk, *Virtual reality surgical simulator-The first steps*. Clinical Orthopaedics and Related Research, 2006(442): p. 2-4.
- [87]. Review, I.N. *Global Augmented and Virtual Reality in Healthcare Market 2019 SWOT Analysis, Threats, Revenue, Profit Margin, Innovative Technology*. 2019 [cited 2019 October]; Available from: <http://industrynewsreview.us/14586/global-augmented-and-virtual-reality-in-healthcare-market-2019-swot-analysis-threats-revenue-profit-margin-innovative-technology/>.
- [88]. Echopixel. *Surgical Imaging*. 2019 [cited 2018 July]; Available from: <https://echopixeltech.com/>.
- [89]. Bernal-Torres, M.G., H.I. Medellín-Castillo, and J.C. Arellano-González, *Design and Control of a New Biomimetic Transfemoral Knee Prosthesis Using an Echo-Control Scheme*. Journal of healthcare engineering, 2018. **2018**.
- [90]. Pérez, C.A.G., H.I. Medellín-Castillo, and R. Espinosa-Castañeda. *Computer Assisted Design and Structural Topology Optimization of Customized Craniofacial Implants*. in *ASME 2017 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2017. American Society of Mechanical Engineers.
- [91]. Li, B.Z., Lei; Sun, Hao; Yuan, Jianbing; Shen, Steve; Wang, Xudong, *A novel method of computer aided orthognathic surgery using individual CAD-CAM templates: a combination of osteotomy and repositioning guides*. British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2013. **51**: p. e239-e244.
- [92]. Kraeima, J., J. Jansma, and R.H. Schepers, *Splintless surgery: does patient-specific CAD-CAM osteosynthesis improve accuracy of Le Fort I osteotomy?* Br J Oral Maxillofac Surg, 2016. **54**(10): p. 1085-1089.
- [93]. Scolozzi, P., *Computer-aided design and computer-aided modeling (CAD/CAM) generated surgical splints, cutting guides and custom-made implants: which indications in orthognathic surgery?* Revue de stomatologie, de chirurgie maxillo-faciale et de chirurgie orale, 2015. **116**(6): p. 343-349.
- [94]. Shaheen, E., Y. Sun, R. Jacobs, and C. Politis, *Three-dimensional printed final occlusal splint for orthognathic surgery: design and validation*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2017. **46**(1): p. 67-71.
- [95]. Li, B., S. Shen, W. Jiang, J. Li, T. Jiang, J. Xia, S. Shen, and X. Wang, *A new approach of splint-less orthognathic surgery using a personalized orthognathic surgical guide system: A preliminary study*. International journal of oral and maxillofacial surgery, 2017. **46**(10): p. 1298-1305.
- [96]. Chen, X., X. Li, L. Xu, Y. Sun, C. Politis, and J. Egger, *Development of a computer-aided design software for dental splint in orthognathic surgery*. Scientific reports, 2016. **6**: p. 38867.
- [97]. Efanov, J.I., A.-A. Roy, K.N. Huang, and D.E. Borsuk, *Virtual Surgical Planning: The Pearls and Pitfalls*. Plastic and Reconstructive Surgery Global Open, 2018. **6**(1).

- [98]. McGrath, J.L., J.M. Taekman, P. Dev, D.R. Danforth, D. Mohan, N. Kman, A. Crichlow, and W.F. Bond, *Using Virtual Reality Simulation Environments to Assess Competence for Emergency Medicine Learners*. Academic Emergency Medicine, 2018. **25**(2): p. 186-195.
- [99]. Palter, V.N. and T.P. Grantcharov, *Individualized deliberate practice on a virtual reality simulator improves technical performance of surgical novices in the operating room: a randomized controlled trial*. Annals of surgery, 2014. **259**(3): p. 443-448.
- [100]. Pulijala, Y., M. Ma, M. Pears, D. Peebles, and A. Ayoub, *Effectiveness of immersive virtual reality in surgical training—A randomized control trial*. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2017.
- [101]. Thomsen, A.S.S., D. Bach-Holm, H. Kjarbo, K. Højgaard-Olsen, Y. Subhi, G.M. Saleh, Y.S. Park, M. la Cour, and L. Konge, *Operating room performance improves after proficiency-based virtual reality cataract surgery training*. Ophthalmology, 2017. **124**(4): p. 524-531.
- [102]. Wrzosek, M.K., Z.S. Peacock, A. Laviv, B.R. Goldwasser, R. Ortiz, C.M. Resnick, M.J. Troulis, and L.B. Kaban, *Comparison of time required for traditional versus virtual orthognathic surgery treatment planning*. International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2016. **45**(9): p. 1065-1069.
- [103]. Greenleaf, W.J., *Virtual reality applications in medicine*. 1995, Microelectronics Communications Technology Producing Quality Products Mobile and Portable Power Emerging Technologies: IEEE.
- [104]. McCloy, R. and R. Stone, *Science, medicine, and the future: Virtual reality in surgery*. BMJ: British Medical Journal, 2001. **323**(7318): p. 912.
- [105]. Cho, S., J. Ku, Y.K. Cho, I.Y. Kim, Y.J. Kang, D.P. Jang, and S.I. Kim, *Development of virtual reality proprioceptive rehabilitation system for stroke patients*. Computer methods and programs in biomedicine, 2014. **113**(1): p. 258-265.
- [106]. Hsu, S.-Y., T.-Y. Fang, S.-C. Yeh, M.-C. Su, P.-C. Wang, and V.Y. Wang, *Three-dimensional, virtual reality vestibular rehabilitation for chronic imbalance problem caused by Ménière's disease: a pilot study*. Disability and rehabilitation, 2017. **39**(16): p. 1601-1606.
- [107]. Kılıc, M.M., O.C. Murath, and C. Catal. *Virtual reality based rehabilitation system for Parkinson and multiple sclerosis patients*. in *Computer Science and Engineering (UBMK), 2017 International Conference on*. 2017. IEEE.
- [108]. Bozzetto, M., S. Rota, V. Vigo, F. Casucci, C. Lomonte, W. Morale, M. Senatore, L. Tazza, M. Lodi, and G. Remuzzi, *Clinical use of computational modeling for surgical planning of arteriovenous fistula for hemodialysis*. BMC medical informatics and decision making, 2017. **17**(1): p. 26.
- [109]. Hon, D.C., *Selectable instruments with homing devices for haptic virtual reality medical simulation*. 2000, Google Patents.
- [110]. Müller, M., S. Schirm, and M. Teschner, *Interactive blood simulation for virtual surgery based on smoothed particle hydrodynamics*. Technology and Health Care, 2004. **12**(1): p. 25-31.
- [111]. Reitinger, B., A. Bornik, R. Beichel, and D. Schmalstieg, *Liver surgery planning using virtual reality*. IEEE Computer Graphics and Applications, 2006. **26**(6).
- [112]. MedicimNV. *Mimics*. 2008 [cited 2017 January]; Available from: <http://www.medicim.com/en/home>.
- [113]. Gélinas-Phaneuf, N., N. Choudhury, A.R. Al-Habib, A. Cabral, E. Nadeau, V. Mora, V. Pazos, P. Debergue, R. DiRaddo, and R.F. Del Maestro, *Assessing performance in brain tumor resection using a novel virtual reality simulator*. International journal of computer assisted radiology and surgery, 2014. **9**(1): p. 1-9.
- [114]. Rhienmora, P., P. Haddawy, P. Khanal, S. Suebnukarn, and M.N. Dailey, *A virtual reality simulator for teaching and evaluating dental procedures*. Methods of information in medicine, 2010. **49**(04): p. 396-405.
- [115]. Tolsdorff, B., A. Pommert, K.H. Höhne, A. Petersik, B. Pflesser, U. Tiede, and R. Leuwer, *Virtual reality: a new paranasal sinus surgery simulator*. The Laryngoscope, 2010. **120**(2): p. 420-426.
- [116]. Vankipuram, M., K. Kahol, A. McLaren, and S. Panchanathan, *A virtual reality simulator for orthopedic basic skills: a design and validation study*. Journal of biomedical informatics, 2010. **43**(5): p. 661-668.
- [117]. Ni, D., W.Y. Chan, J. Qin, Y.-P. Chui, I. Qu, S.S. Ho, and P.-A. Heng, *A virtual reality simulator for ultrasound-guided biopsy training*. IEEE Computer Graphics and Applications, 2011. **31**(2): p. 36-48.
- [118]. Iwata, N., M. Fujiwara, Y. Kodera, C. Tanaka, N. Ohashi, G. Nakayama, M. Koike, and A. Nakao, *Construct validity of the LapVR virtual-reality surgical simulator*. Surgical endoscopy, 2011. **25**(2): p. 423-428.
- [119]. Delorme, S., D. Laroche, R. DiRaddo, and R.F. Del Maestro, *NeuroTouch: a physics-based virtual simulator for cranial microneurosurgery training*. Operative Neurosurgery, 2012. **71**(suppl\_1): p. ons32-ons42.
- [120]. Linte, C.A., K.E. Augustine, J.J. Camp, R.A. Robb, and D.R. Holmes III, *Toward virtual modeling and templating for enhanced spine surgery planning*, in *Spinal Imaging and Image Analysis*. 2015, Springer. p. 441-467.

- [121]. 3D\_Systems. *GI Mentor*. 2017 [cited 2018 March]; Available from: <http://symbionix.com/wp-content/pdf/Brochures/healthcare-gi-brochure-2017.9.en-web.pdf>.
- [122]. 3D\_Systems. *URO-PERC Mentor*. 2017 [cited 2018 March]; Available from: [http://symbionix.com/wp-content/pdf/Brochures/URO\\_PERC\\_Brochure\\_12\\_2016-Web.pdf](http://symbionix.com/wp-content/pdf/Brochures/URO_PERC_Brochure_12_2016-Web.pdf).
- [123]. Korzeniowski, P., D.C. Brown, M.H. Sodergren, A. Barrow, and F. Bello, *Validation of NOViSE: A Novel Natural Orifice Virtual Surgery Simulator*. *Surgical innovation*, 2017. **24**(1): p. 55-65.
- [124]. Slicer, B.a.D. *3D\_Slicer*. 2018 [cited 2018 March]; Available from: <https://www.slicer.org/>.
- [125]. ITK-SNAP. 2018 [cited 2018 March 2018]; Available from: <http://www.itksnap.org/pmwiki/pmwiki.php>.
- [126]. Oxipita\_Inc. *TurtleSeg: 3D image segmentation software*. 2010 [cited 2018 March]; Available from: <http://www.turtleseg.org/index.php?page=software>.
- [127]. PathersonDentalSupply. *Dolphin Imaging*. 2017; Available from: <https://www.dolphinimaging.com>.
- [128]. Kedzierski, M. and A. Fryskowska, *Methods of laser scanning point clouds integration in precise 3D building modelling*. *Measurement*, 2015. **74**: p. 221-232.
- [129]. Bernardini, F. and H. Rushmeier. *The 3D model acquisition pipeline*. in *Computer graphics forum*. 2002. Wiley Online Library.
- [130]. Gobbetti, E. and F. Marton. *Far voxels: a multiresolution framework for interactive rendering of huge complex 3d models on commodity graphics platforms*. in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2005. ACM.
- [131]. Steinbrücker, F., J. Sturm, and D. Cremers. *Volumetric 3D mapping in real-time on a CPU*. in *Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on*. 2014. IEEE.
- [132]. Hannaford, B., J.K. Barral, E. Rephaeli, C.D. Ching, and V.S. Bajaj, *Heads-up displays for augmented reality network in a medical environment*. 2017, Google Patents.
- [133]. Yoshida, S., K. Kihara, H. Takeshita, and Y. Fujii, *Instructive head-mounted display system: pointing device using a vision-based finger tracking technique applied to surgical education*. *Videosurgery and Other Miniinvasive Techniques*, 2014. **9**(3): p. 449.
- [134]. Mihelj, M., D. Novak, and S. Beguš, *Virtual reality technology and applications*. 2016: Springer.
- [135]. Harris, M. and N. Hunt, *Fundamentals of orthognathic surgery*. 2008: Imperial College Press.
- [136]. Reyneke, J.P., *Essentials of orthognathic surgery*. 2003: Quintessence Chicago.
- [137]. Jacobson, A., W. Evans, C. Preston, and P. Sadowsky, *Mandibular prognathism*. *American journal of orthodontics*, 1974. **66**(2): p. 140-171.
- [138]. Bell, W.H., *Surgical correction of mandibular retrognathism*. *American journal of orthodontics*, 1966. **52**(7): p. 518-528.
- [139]. Ngan, P. and H. Fields, *Open bite: a review of etiology and management*. *Pediatric dentistry*, 1997. **19**(2): p. 91-98.
- [140]. Haraguchi, S., K. Takada, and Y. Yasuda, *Facial asymmetry in subjects with skeletal Class III deformity*. *The Angle Orthodontist*, 2002. **72**(1): p. 28-35.
- [141]. Ezquerro, F., M. Berrazueta, A. Ruiz-Capillas, and J.S. Arregui, *New approach to the gummy smile*. *Plastic and reconstructive surgery*, 1999. **104**(4): p. 1143-50; discussion 1151-2.
- [142]. Angle, E.H., *Some studies in occlusion*. *The Angle orthodontist*, 1968. **38**(1): p. 79-81.
- [143]. Paranhos, L.R., W.A. Andrews, R.P. Jórias, F. Bérzin, E.D. Júnior, and T. Triviño, *Dental arch morphology in normal occlusions*. *Brazilian Journal of Oral Sciences*, 2016: p. 65-68.
- [144]. Gravely, J. and D. Johnson, *Angle's classification of malocclusion: an assessment of reliability*. *British journal of orthodontics*, 1974. **1**(3): p. 79-86.
- [145]. Angle, E.H., *Treatment of malocclusion of the teeth: Angle's system*. 1907: White Dental Manufacturing Company.
- [146]. Instituto\_Maxilofacial. *La Cirugia Ortognática*. 2018 [cited 2018 May]; Available from: <https://www.institutomaxilofacial.com/es/cirugia-ortognatica/que-es-la-cirugia-ortognatica/>.
- [147]. Gregoret, J., *Ortodoncia y cirugía ortognática diagnóstico y planificación*. 2000.
- [148]. Barère, F., M. Sapène, Y. Mutel, N. Raymond, A. Andrieux, and J. Forcioli, *Relationship between obstructive sleep apnea and orthognathic surgery*. *Journal of Dentofacial Anomalies and Orthodontics*, 2016. **19**(2): p. 204.
- [149]. Choi, S.-H., B.-I. Kim, J.-Y. Cha, and C.-J. Hwang, *Impact of malocclusion and common oral diseases on oral health-related quality of life in young adults*. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 2015. **147**(5): p. 587-595.
- [150]. Kumar, S., A.C. Williams, A.J. Ireland, and J.R. Sandy, *Orthognathic cases: what are the surgical costs?* *The European Journal of Orthodontics*, 2007. **30**(1): p. 31-39.



- [151]. Doctoralia\_México. *Reparación de cirugía de mandíbula*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.doctoralia.com.mx/preguntas-respuestas/cual-es-el-precio-aproximado-de-una-cirugia-de-la-mandibula-para-corregir-la-retrognatia-ya-se-que-depnde>.
- [152]. Birbe, J., *Planificación clásica en cirugía ortognática*. Revista Española de Cirugía Oral y Maxilofacial, 2014. **36**(3): p. 99-107.
- [153]. Proffit, W.R., C. Phillips, and T.A. Turvey, *Stability following superior repositioning of the maxilla by LeFort I osteotomy*. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1987. **92**(2): p. 151-161.
- [154]. Patel, P.K. and M.V. Novia, *The surgical tools: the LeFort I, bilateral sagittal split osteotomy of the mandible, and the osseous genioplasty*. Clinics in plastic surgery, 2007. **34**(3): p. 447-475.
- [155]. Trauner, R. and H. Obwegeser, *The surgical correction of mandibular prognathism and retrognathia with consideration of genioplasty: Part I. Surgical procedures to correct mandibular prognathism and reshaping of the chin*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology, 1957. **10**(7): p. 677-689.
- [156]. Patel, P.K., C.A.E. Monzavi, and D.E. Morris, *Bilateral Sagittal Split Osteotomy (BSSO) of the Mandibular Ramus*, in *Operative Dictations in Plastic and Reconstructive Surgery*. 2017, Springer. p. 215-219.
- [157]. Chang, E.W., S.M. Lam, M. Karen, and J.L. Donlevy, *Sliding genioplasty for correction of chin abnormalities*. Archives of facial plastic surgery, 2001. **3**(1): p. 8-15.
- [158]. Arnett, G.W., J.S. Jelic, J. Kim, D.R. Cummings, A. Beress, C.M. Worley Jr, B. Chung, and R. Bergman, *Soft tissue cephalometric analysis: diagnosis and treatment planning of dentofacial deformity*. American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics, 1999. **116**(3): p. 239-253.
- [159]. Milutinovic, J., K. Zelic, and N. Nedeljkovic, *Evaluation of facial beauty using anthropometric proportions*. The Scientific World Journal, 2014. **2014**.
- [160]. Kristek, E. and A. Čelebić, *Analysis of width/length ratios of normal clinical crowns of the maxillary anterior dentition: correlation between dental proportions and facial measurements*. International journal of prosthodontics, 2007. **20**(3).
- [161]. Arnett, G.W. and R.T. Bergman, *Facial keys to orthodontic diagnosis and treatment planning. Part I*. American journal of orthodontics and dentofacial orthopedics, 1993. **103**(4): p. 299-312.
- [162]. Zamora Montes de Oca, C., *Compendio de cefalometría. Análisis Clínico y Práctico*. Bogotá: Amolca, 2004: p. 427-428.
- [163]. Legan, H.L. and C.J. Burstone, *Soft tissue cephalometric analysis for orthognathic surgery*. Journal of oral surgery (American Dental Association: 1965), 1980. **38**(10): p. 744-751.
- [164]. Barahona Cubillo, J.B. and J. Benavides Smith, *Principales análisis cefalométricos utilizados para el diagnóstico ortodóntico*. Revista científica odontológica, 2006. **2**(1).
- [165]. Burstone, C.J., R.B. James, H. Legan, G. Murphy, and L.A. Norton, *Cephalometrics for orthognathic surgery*. Journal of oral surgery (American Dental Association: 1965), 1978. **36**(4): p. 269-277.
- [166]. Proffit, W.R., H.W. Fields, and D.M. Sarver, *Contemporary Orthodontics-E-Book*. 2014: Elsevier Health Sciences.
- [167]. Sharifi, A., R. Jones, A. Ayoub, K. Moos, F. Walker, B. Khambay, and S. McHugh, *How accurate is model planning for orthognathic surgery?* Int J Oral Maxillofac Surg, 2008. **37**(12): p. 1089-93.
- [168]. Haas Jr, O.L., O.E. Becker, and R.B. de Oliveira, *Computer-aided planning in orthognathic surgery-systematic review*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2014.
- [169]. Tanikawa, C., M. Yagi, and K. Takada, *Automated cephalometry: system performance reliability using landmark-dependent criteria*. The Angle Orthodontist, 2009. **79**(6): p. 1037-1046.
- [170]. Nagasaka, S., T. Fujimura, and K. Segoshi, *Development of a non-radiographic cephalometric system*. The European Journal of Orthodontics, 2003. **25**(1): p. 77-85.
- [171]. Chen, S.-K., Y.-J. Chen, C.-C.J. Yao, and H.-F. Chang, *Enhanced speed and precision of measurement in a computer-assisted digital cephalometric analysis system*. The Angle Orthodontist, 2004. **74**(4): p. 501-507.
- [172]. Nemotec. *NemoCeph*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.nemotec.com/es/software/nemoceph>.
- [173]. Patterson\_Dental\_Inc. *Dolphin Imaging*. 2018 [cited 2018 March]; Available from: <https://www.dolphinimaging.com/>.
- [174]. Orca\_Dental\_AI. *Ceph\_X*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://cephx.com/cephalometric-analysis-based-x-ray-scans/>.
- [175]. Elite\_Computer\_Italia. *Oris\_Ceph\_Rx*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.orisline.com/en/software-for-cephalometric-analysis/>.
- [176]. AudaxCeph. *AudaxCeph*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.audaxceph.com/>.

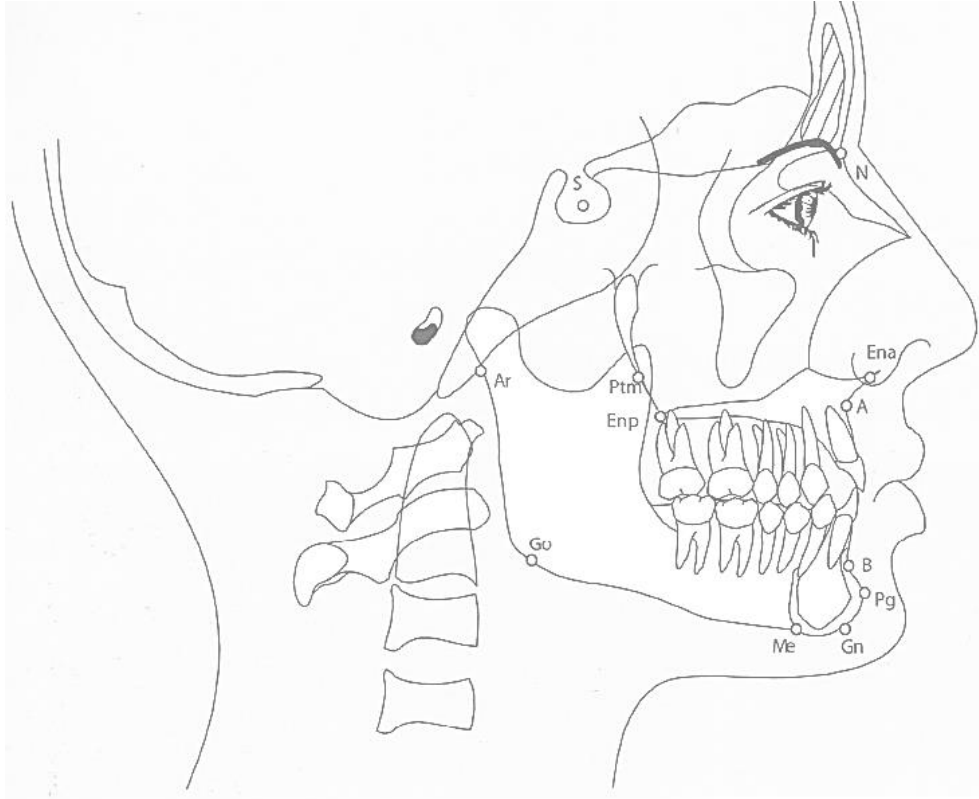
- [177]. dHAL\_Software. *Viewbox\_4*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <http://www.dhal.com/viewboxindex.htm>.
- [178]. Planmeca. *Romerix*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.planmeca.com/na/software/desktop/planmeca-romerix/>.
- [179]. Swennen, G.R.J., *3D Virtual Treatment Planning of Orthognathic Surgery*, in *3D Virtual Treatment Planning of Orthognathic Surgery: A Step-by-Step Approach for Orthodontists and Surgeons*, G. Swennen, Editor. 2017, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 217-277.
- [180]. Govea-Valladares, E.H., H.I. Medellin-Castillo, J. Ballesteros, and M.A. Rodriguez-Florida, *On the development of virtual reality scenarios for computer-assisted biomedical applications*. Journal of healthcare engineering, 2018. **2018**.
- [181]. Mischkowski, R.A., M.J. Zinser, A.C. Kübler, B. Krug, U. Seifert, and J.E. Zöllner, *Application of an augmented reality tool for maxillary positioning in orthognathic surgery—a feasibility study*. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2006. **34**(8): p. 478-483.
- [182]. Badiali, G., V. Ferrari, F. Cutolo, C. Freschi, D. Caramella, A. Bianchi, and C. Marchetti, *Augmented reality as an aid in maxillofacial surgery: validation of a wearable system allowing maxillary repositioning*. J Cranio-maxillofac Surg, 2014. **42**(8): p. 1970-6.
- [183]. Ohta, Y. and H. Tamura, *Mixed reality: merging real and virtual worlds*. 2014: Springer Publishing Company, Incorporated.
- [184]. Olszewski, R., M.B. Villamil, D.G. Trevisan, L.P. Nedel, C.M. Freitas, H. Reyhler, and B. Macq, *Towards an integrated system for planning and assisting maxillofacial orthognathic surgery*. Computer methods and programs in biomedicine, 2008. **91**(1): p. 13-21.
- [185]. Fushima, K. and M. Kobayashi, *Mixed-reality simulation for orthognathic surgery*. Maxillofacial plastic and reconstructive surgery, 2016. **38**(1): p. 13.
- [186]. Woo, S.-Y., J.-J. Han, S. Lee, W.-J. Lee, S.-R. Kang, S.-J. Hwang, and W.-J. Yi. *Development of a robot-assisted orthognathic surgery system integrated with image-guided navigation*. in *2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob)*. 2016. IEEE.
- [187]. Wang, X., R. Song, X. Liu, Q. Li, T. Cheng, and Y. Xue. *System design for orthognathic aided robot*. in *2015 IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)*. 2015. IEEE.
- [188]. Guo, C., J. Deng, X. Duan, L. Chen, X. Liu, G. Yu, C. Wang, and G. Shen, *Development of a Robot-Assisted Surgery System for Cranio-Maxillofacial Surgery*, in *Interface Oral Health Science 2016*. 2017, Springer, Singapore. p. 65-72.
- [189]. Levine, J.P., A. Patel, P.B. Saadeh, and D.L. Hirsch, *Computer-aided design and manufacturing in craniomaxillofacial surgery: the new state of the art*. Journal of Craniofacial Surgery, 2012. **23**(1): p. 288-293.
- [190]. Materialise. *Materialise ProPlan CMF*. 2017 [cited 2017 October]; Available from: <http://www.materialise.com/en/medical/software>.
- [191]. NemoTec. *NemoFAB*. 2016 [cited 2017 June]; Available from: <https://www.nemotec.com>.
- [192]. Keeve, E.G., Sabine; Girod, Bernd. *Computer-aided craniofacial surgery*. in *Proc. Computer Assisted Radiology*. 1996.
- [193]. Noguchi, N., M. Tsuji, M. Shigematsu, and M. Goto, *An orthognathic simulation system integrating teeth, jaw and face data using 3D cephalometry*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007. **36**(7): p. 640-5.
- [194]. Jones, R.M., B.S. Khambay, S. McHugh, and A.F. Ayoub, *The validity of a computer-assisted simulation system for orthognathic surgery (CASSOS) for planning the surgical correction of class III skeletal deformities: single-jaw versus bimaxillary surgery*. Int J Oral Maxillofac Surg, 2007. **36**(10): p. 900-8.
- [195]. Wu, F., X. Chen, Y. Lin, C. Wang, X. Wang, G. Shen, J. Qin, and P.A. Heng, *A virtual training system for maxillofacial surgery using advanced haptic feedback and immersive workbench*. Int J Med Robot, 2014. **10**(1): p. 78-87.
- [196]. 3D\_Systems. *VSP\_Orthognathics*. 2013 [cited 2019 April]; Available from: <https://www.3dsystems.com/vsp/vsp-orthognathics>.
- [197]. Żuk, M., J. Mazur, M. Żmudzińska, M. Majak, M. Popek, and E. Świątek-Najwer. *An Application of a Haptic Device in a Computer Aided Surgery*. in *International Conference on Information Technologies in Biomedicine*. 2018. Springer.
- [198]. Arikatla, V.S., M. Tyagi, A. Enquobahrie, T. Nguyen, G.H. Blakey, R. White, and B. Paniagua. *High fidelity virtual reality orthognathic surgery simulator*. in *Medical Imaging 2018: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*. 2018. International Society for Optics and Photonics.

- [199]. McAllister, P., M. Watson, and E. Burke, *A cost-effective, in-house, positioning and cutting guide system for orthognathic surgery*. Journal of maxillofacial and oral surgery, 2018. **17**(1): p. 112-114.
- [200]. Yuan, P., H. Mai, J. Li, D.C.-Y. Ho, Y. Lai, S. Liu, D. Kim, Z. Xiong, D.M. Alfi, and J.F. Teichgraeber, *Design, development and clinical validation of computer-aided surgical simulation system for streamlined orthognathic surgical planning*. International journal of computer assisted radiology and surgery, 2017. **12**(12): p. 2129-2143.
- [201]. Lee, S.-J., S.-Y. Woo, K.-H. Huh, S.-S. Lee, M.-S. Heo, S.-C. Choi, J.J. Han, H.J. Yang, S.J. Hwang, and W.-J. Yi, *Virtual skeletal complex model-and landmark-guided orthognathic surgery system*. Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, 2016. **44**(5): p. 557-568.
- [202]. Shirota, T., S. Shiogama, H. Watanabe, Y. Kurihara, T. Yamaguchi, K. Maki, T. Kamatani, and S. Kondo, *Three-dimensional virtual planning and intraoperative navigation for two-jaw orthognathic surgery*. Journal of oral and maxillofacial surgery, medicine, and pathology, 2016. **28**(6): p. 530-534.
- [203]. Lee, U.-L., J.-S. Kwon, and Y.-J. Choi, *Keyhole system: A computer-assisted designed and computer-assisted manufactured maxillomandibular complex repositioner in orthognathic surgery*. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2015. **73**(10): p. 2024-2029.
- [204]. Lutz, J.-C., A. Hostettler, V. Agnus, S. Nicolau, D. George, L. Soler, and Y. Rémond, *A new software suite in orthognathic surgery: patient specific modeling, simulation and navigation*. Surgical innovation, 2019. **26**(1): p. 5-20.
- [205]. Gottlieb, R., J.M. Vervoorn, and J. Buchanan, *Simulation in dentistry and oral health*, in *The comprehensive textbook of healthcare simulation*. 2013, Springer. p. 329-340.
- [206]. IEC, I., *9126-1 (2001). Software Engineering Product Quality-Part 1: Quality Model*. International Organization for Standardization, 2001.
- [207]. Bhatti, S.N., *Why quality?: ISO 9126 software quality metrics (Functionality) support by UML suite*. ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, 2005. **30**(2): p. 1-5.
- [208]. Abdel-Moniem Barakat, A., A. Abou-EIFetouh, M.M. Hakam, H. El-Hawary, and K.M. Abdel-Ghany, *Clinical and radiographic evaluation of a computer-generated guiding device in bilateral sagittal split osteotomies*. J Craniomaxillofac Surg, 2014. **42**(5): p. e195-203.
- [209]. Filman, R., T. Elrad, S. Clarke, and M. Akşit, *Aspect-oriented software development*. 2004: Addison-Wesley Professional.
- [210]. Feller, J. and B. Fitzgerald, *Understanding open source software development*. 2002: Addison-Wesley London.
- [211]. Kitware\_Inc. *VTK The visualization toolkit*. 2018 [cited 2017 March]; Available from: <https://www.vtk.org/>.
- [212]. H3DAPI. *H3DAPI Open Source Haptics*. 2014 [cited 2017 March]; Available from: <http://www.h3dapi.org/>.
- [213]. Erwin Coumans, e.a. *Bullet Physics SDK*. 2017 [cited 2017 March]; Available from: <http://bulletphysics.org/wordpress/>.
- [214]. 3D\_Systems. *Touch Haptic Device*. 2019 [cited 2019 January]; Available from: <https://www.3dsystems.com/haptics-devices/touch/features>.
- [215]. Novint\_Technologies\_Inc. *Novint Falcon*. 2018 [cited 2019 January]; Available from: novint.com.
- [216]. Buck, I., G. Humphreys, and P. Hanrahan. *Tracking graphics state for networked rendering*. in *Proceedings of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*. 2000. ACM.
- [217]. Basdogan, C. and M.A. Srinivasan, *Haptic rendering in virtual environments*, in *Handbook of virtual environments*. 2002, CRC Press. p. 157-174.
- [218]. Erleben, K., J. Sparring, K. Henriksen, and H. Dohlmann, *Physics-based animation*. 2005: Charles River Media.
- [219]. Liou, E.J., P.-H. Chen, Y.-C. Wang, C.-C. Yu, C. Huang, and Y.-R. Chen, *Surgery-first accelerated orthognathic surgery: orthodontic guidelines and setup for model surgery*. Journal of Oral and Maxillofacial Surgery, 2011. **69**(3): p. 771-780.
- [220]. Stein, S.K. and A. Barcellos, *Calculus and analytic geometry*. 1992: McGraw-Hill New York.
- [221]. Casella, G., S. Fienberg, and I. Olkin, *Matrix Algebra: Theory, Computations, and Applications in Statistics*. 2007: Springer New York.
- [222]. Wang, J. and G. Yao, *Obj three-dimensional model file format in OpenGL, input and processing*. Computer Knowledge and Technology, 2011. **10**: p. 068.
- [223]. Rivero, M. and F.R. Feito, *Boolean operations on general planar polygons*. Computers & Graphics, 2000. **24**(6): p. 881-896.
- [224]. Adams, B. and P. Dutré. *Interactive boolean operations on surfel-bounded solids*. in *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. 2003. ACM.

- [225]. Cassi, D., C. De Biase, I. Tonni, M. Gandolfini, A. Di Blasio, M.J.B.J.o.O. Piancino, and M. Surgery, *Natural position of the head: review of two-dimensional and three-dimensional methods of recording*. 2016. **54**(3): p. 233-240.
- [226]. Damstra, J., Z. Fourie, Y.J.B.J.o.O. Ren, and M. Surgery, *Simple technique to achieve a natural position of the head for cone beam computed tomography*. 2010. **48**(3): p. 236-238.
- [227]. Kim, D.-S., H.J. Yang, K.-H. Huh, S.-S. Lee, M.-S. Heo, S.-C. Choi, S.J. Hwang, and W.-J.J.J.o.C.-M.S. Yi, *Three-dimensional natural head position reproduction using a single facial photograph based on the POSIT method*. 2014. **42**(7): p. 1315-1321.
- [228]. Chen, Y.-J., S.-K. Chen, J. Chung-Chen Yao, and H.-F. Chang, *The effects of differences in landmark identification on the cephalometric measurements in traditional versus digitized cephalometry*. *The Angle orthodontist*, 2004. **74**(2): p. 155-161.
- [229]. Ongkosuwito, E., C. Katsaros, M. Van't Hof, J. Bodegom, and A. Kuijpers-Jagtman, *The reproducibility of cephalometric measurements: a comparison of analogue and digital methods*. *The European Journal of Orthodontics*, 2002. **24**(6): p. 655-665.

## Apéndice 1. Metodologías cefalométricas

### *Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Burstone y Legan*



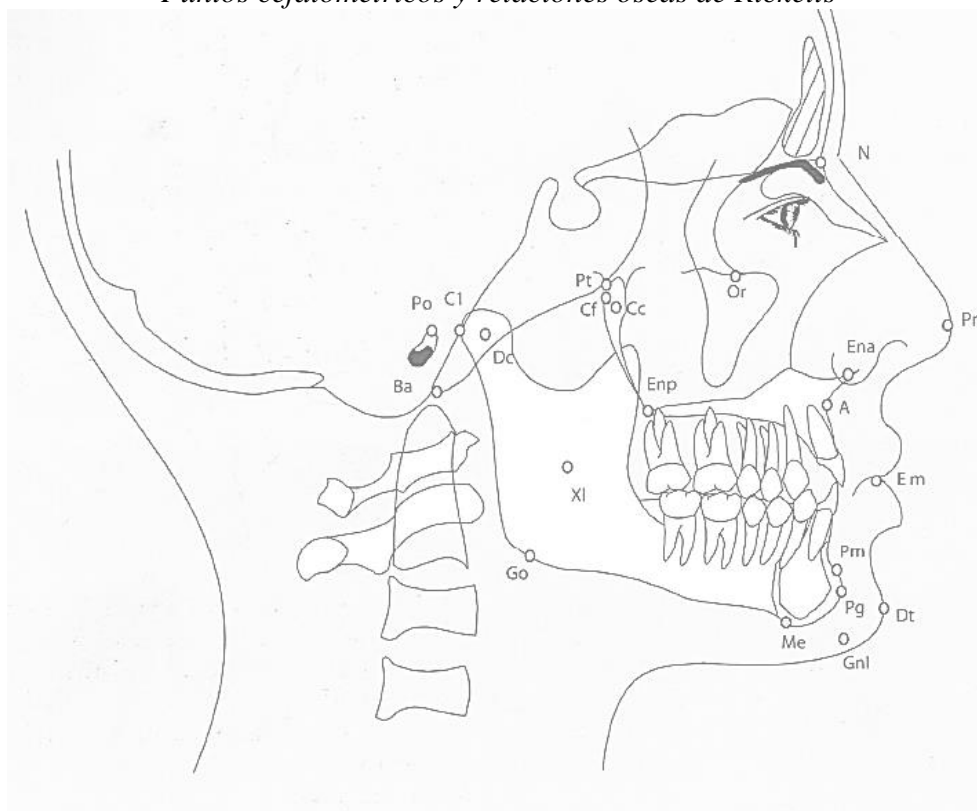
### *Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto A o subespinal
Ar	Articular
B	Supramentoniano
Ena	Espina nasal anterior
Enp	Espina nasal posterior
Gn	Gavión
Go	Gonión
Me	Mentón
N	Nasión
Pg	Pogonión
Ptm	Pterigomaxilar
S	Silla turca

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
A-B	Longitud A-B	1.1mm	2mm
Ar-Go	Altura de la rama	52.0mm	4.2mm
Ar-Go-Gn	Angulo gonial	119.1°	6.5°
Ar-Ptm	Articular-fisura pterigomaxilar	37.1mm	2.8mm
B-Pg	Dimensión anteroposterior	8.9mm	1.7mm
Ena-Enp	Longitud maxilar	57.7mm	2.5mm
Ena-Gn	-	68.6mm	3.8mm
Enp-N	-	53.9mm	1.7mm
Go-Pg	Longitud del cuerpo mandibular	83.7mm	4.6mm
Inc- Sup-PI.P.	Incisivo superior-plano palatino	30.5mm	2.1mm
Inc. Inf.-PI.M	Incisivo superior-plano mandibular	45mm	2.1mm
I-PI.P	Incisivo superior-Plano palatino	111.0o	4.7°
I-PM	Incisivo inferior-Plano mandibular	95.9°	5.2°
Molar Inf. PI.Mand	Molar inferior-plano mandibular	35.8mm	2.6mm
Molar Sup.-PI.P	Molar superior-plano palatino	26.2mm	2.0mm
N-A	-	0mm	3.7mm
N-A-Pg	Ángulo N-A-Pg	3.9°	6.4°
N-B	-	-5.3mm	6.7mm
N-Ena	-	54.7mm	3.2mm
N-Pg	-	-4.3mm	8.5mm
PI.Oc.PH	Plano oclusal-Plano horizontal	6.2°	5.1°
Pm-PH	Plano mandibular, ángulo Pm-PH	23°	5.9°
Ptm-N	Fisura pterigomaxilar-nasión	52.8mm	4.1mm

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Ricketts*



*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto A o Subespinal
Ba	Bastión
C1	Punto C1
Cc	Punto Cc
Cf	Punto Cf
Dc	Punto Dc
Dt	Punto Dt
Em	Punto Em
Ena	Espina nasal anterior
Enp	Espina nasal posterior
Gnl	Gavión intersección
Go	Gonion
Me	Mentón
N	Nasión
Or	Orbital
Pg	Pogonión
Pm	Protuberancia menti
Pn	Punto Pn
Po	Porión
Pt	Punto Pt
XI	Punto XI

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
	Posición del primer molar superior	3.0mm	3.0mm
A/N-Pg	Convexidad	2.0mm	2.0mm
A1-A2/A-Pg	Inclinación del incisivo superior	28°	4°
A1-A2/B1-B2	Ángulo interincisal	130°	6.0o
A3-B3	Relación canina	2mm	3.0mm
A6-B6	Relación molar	3.0mm	3.0mm
B1/A-Pg	Protrusión del incisivo inferior	1.0mm	2.3mm
B1-A1	Sobremordida horizontal	2.5mm	2.5mm
B1-A1	Sobremordida vertical	2.5mm	2.5mm
B1-B2/APg	Inclinación del incisivo inferior	22°	4°
B1-PI-OcI	Extrusión del incisivo inferior	1.25mm	2.0mm
Ba-Na/Po-Or	Deflexión craneal	27°	3°
Ba-Na/Pt-GnI	Eje facial	90°	3.5°
Cc-N	Longitud craneal anterior	55mm	2.5mm
Dc-XI/XI-Pm	Arco mandibular Arco mandibular	26°	4°
Em-Plano Oclusal	Plano oclusal al labio superior	-3.5	1.0mm
Ena-Em	Longitud del labio superior	24mm	2.0 mm
Ena-XI-Pm	Altura facial inferior	47°	4°
GoI-Cf	Altura facial superior	55mm	3.3 mm
Go-Me/Po-Or	Ángulo del plano mandibular	26°	4.5°
Li/Pn-Dt	Protrusión labial	2mm	2.0mm
N-Cf-A	Altura maxilar	53°	3.0o
Po-Or/Cf-XI	Posición de la rama	76°	3°
Po-Or/Ena-Enp	Inclinación del plano palantino	1°	3.5°
Po-Or/N-A	Profundidad maxilar	90°	3°
Po-Or/N-Pg	Profundidad facial	87°	3°
Po-PtV	Localización de porción	31.9mm	2.2 mm
XI	Plano oclusal	0mm	3.0mm
XI-Pm	Longitud del cuerpo mandibular	65mm	2.7mm



*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Downs*



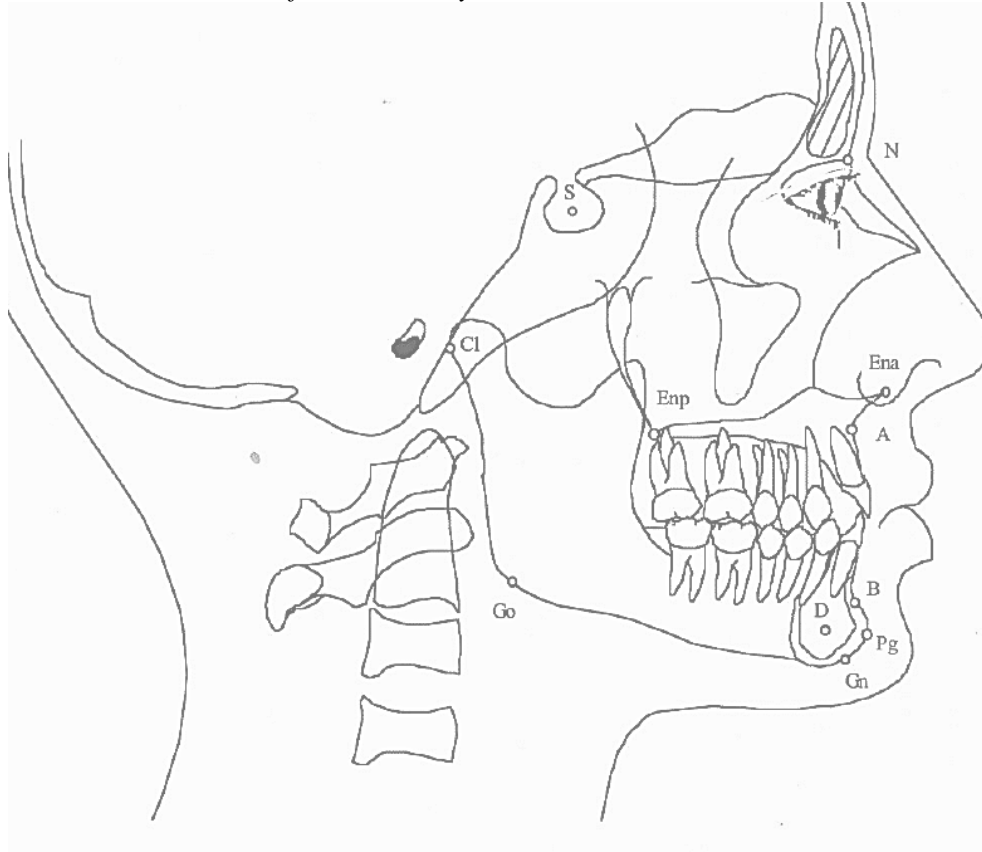
*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto A o Subespinal
B	Supramental
Ena	Espina nasal anterior
Enp	Espina nasal posterior
Gn	Gnación
Go	Gonión
Me	Mentón
N	Nasión
Or	Orbital
Pg	Pogonión
Po	Pogonión
S	Silla Turca

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
Po-Or/N-Pg	Angulo facial	87.8°	3.57°
A-B/Na-Pg	Plano A-B	-4.6°	3.67°
S-Gn/Po-Or	Eje Y	59.4°	3.82°
N-A/A-Pg	Angulo de la convexidad	0°	4.78°
Po-Or/Go-Me	Angulo mandibular	21.9°	3.24°
Po-Or	Plano oclusal	9.5°	3.83°

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Steiner*



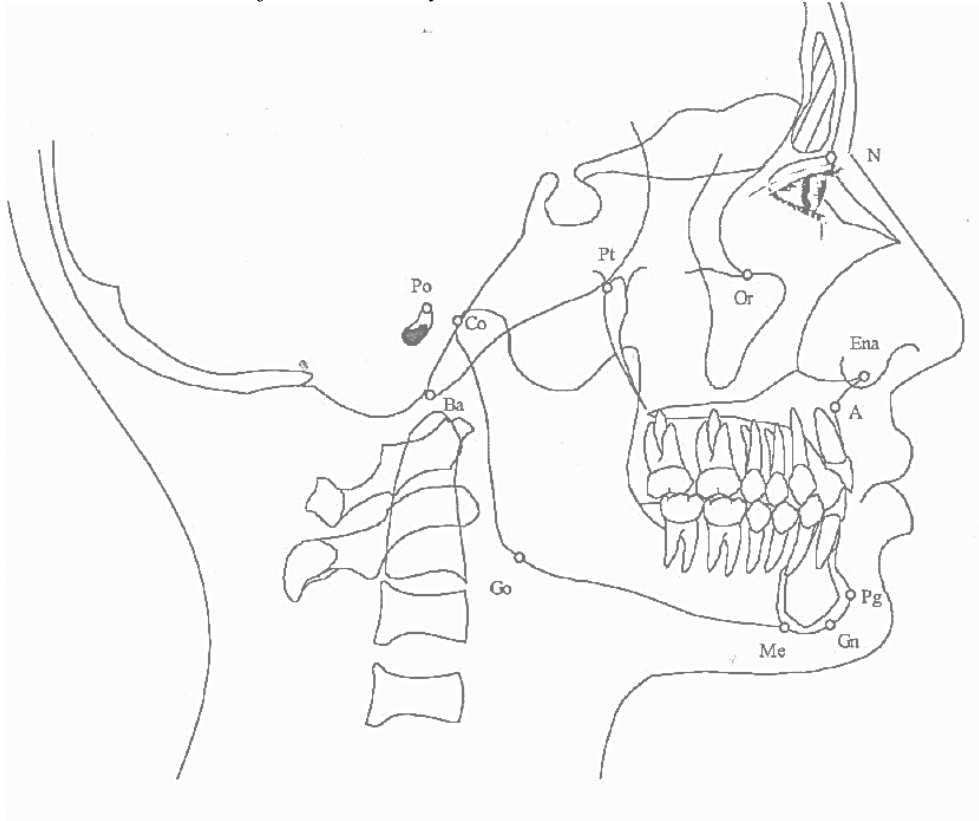
*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto A
B	Punto B
CI	
D	Punto D
Ena	Espina nasal anterior
Enp	Espina nasal posterior
Gn	Gnación
Go	Gonión
N	Nasión
Pg	Pogonión
S	Silla turca

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
SNA	Angulo S-N-A	82°	1°
SNB	Angulo S-N-B	80°	1°
ANB	Ángulo-N-B	2°	0.5°
SND	Angulo S-N-D	76°	3°
SL	Segmento SL	51mm	3mm
SE	Segmento SE	22mm	2mm
Go-Gn S-N	Angulo (Go-Gn)-(S-N)	32°	3°
S-N	Plano oclusal	14°	5°
Iis -NA	Angulo incisivo superior-N-A	22°	3.5°
Iis-(N-A)	Distancia incisivo superior a línea N-A	4mm	1mm
I/Ena-Enp	Angulo incisivo superior-plano palatino	70°	3°
Iis-S-N	Angulación del incisivo superior con S-N	103°	15°
Iis-(N-B)	Angulo incisivo superior-(N-B)	22°	3°
Iis-(N-A)	Angulo incisivo superior-(N-A)	4mm	1.5mm
Iis/Ena-Enp	Incisivo superior-plano palatino	70°	3°
	Angulación del incisivo superior con S-N	103°	5°
Ii-NB	Angulo incisivo inferior-(N-B)	25°	3°
	Distancia incisivo inferior a línea N-B	4mm	1.5mm
Ii-(Go-Gn)	Incisivo inferior al plano Go-Gn	90°	3°
	Angulo interincisal	131°	5°
	Línea S	0 mm	3mm

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de McNamara*



*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Punto cefalométrico</b>
A	Punto A
Ba	Basió
Co	Consilión
Ena	Espina nasal anterior
Gn	Gnación anatómico
GnI	Gnación intersector
Go	Gonión
Me	Mentón
N	Nasin
Or	Orbital
Pg	Pogonioón
Po	Porió
Ptm	Fisura Pterigomaxilar

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
Nap-A	Nasión perpendicular	1.1mm	2.7mm
Co-Gn	Longitud mandibular efectiva Co-Gn	132.3mm	6.8mm
Co-Ae	Longitud maxilar efectiva Co-A	99.8mm	6.0mm
Co-A/Co-Gn	Diferencia máxilomandibular	32.5mm	4.0mm
Ena-Me	Altura facial anteroinferior	74.6mm	5.0mm
Po-Or/Go-Me	Angulo del plano mandibular	21.3°	3.9°
Ba-N/Pt-Gn-Iis	Angulo del eje facial	0.5°	3.5°
Pg-Np	Nasión perpendicular-pogonión	0.3mm	3.8mm
Nap-Is	Incisivo superior contra la vertical del punto A	5.3mm	2.0mm
Ii-Pg	Incisivo inferior contra A-pogonión	2.3mm	2.1mm

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Jaraback*



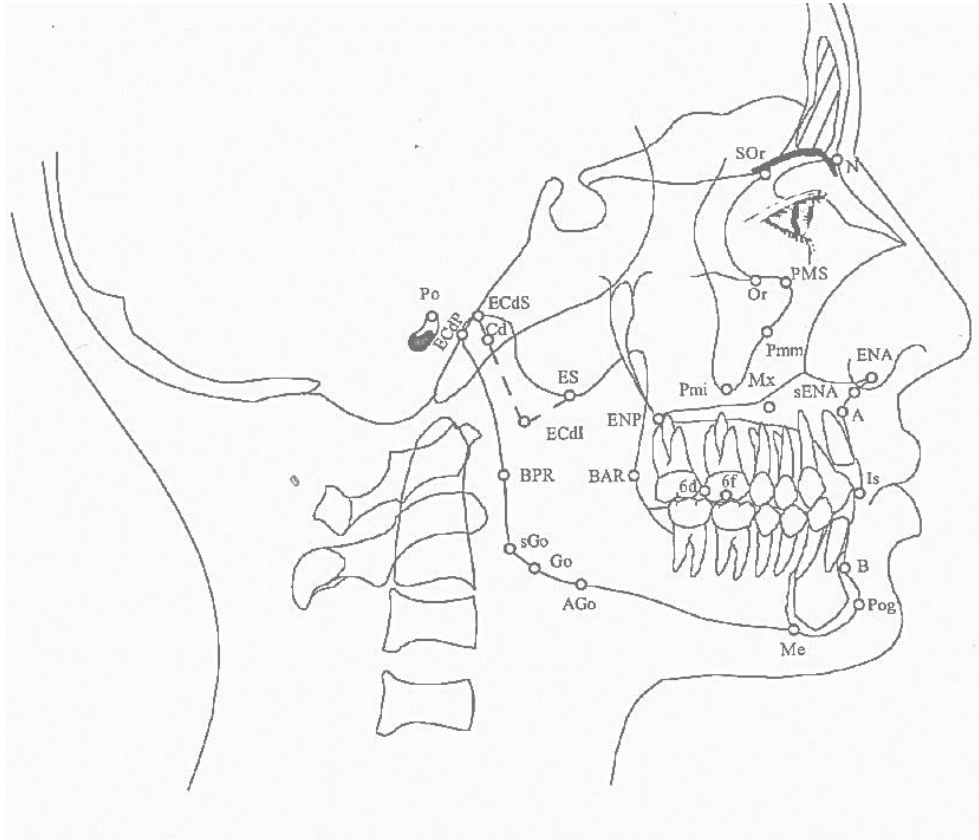
*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto
Ar	Articular
B	Punto
ENA	Espina nasal Anterior
ENP	Espina nasal posterior
Gn	Gnación
Go	Gonión
Me	Mentón
N	Nasión
Pg	Pogonión
S	Silla

*Relaciones óseas*

<b>Acrónimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
N-S-Ar	Ángulo de la silla	123°	5°
-S-Ar-Go	Ángulo articular	143°	6°
Ar-Go-Gn	Angulo Gonial	130°	7°
S-Ar-Go y Ar-Go-Gn	Suma de los ángulos (N-S-Ar)	396°	-
S-N	Longitud craneal anterior	71mm	3mm
S-Ar	Longitud craneal posterior	32mm	3mm
N- Go-Gn	Angulo Gonial	55°	
Ar-Go	Altura de la rama	44mm	5
Go -Gn	Longitud de cuerpo mandibular	71mm	5mm
SNA	Angulo S-N-A	80°	5°
SNB	Angulo S-N-B	78°	-
ANB	Angulo A-N-B	2°	-
Go-Gn-SN	Angulo (Go-Gn)-(S-N)	32o	-
Is-Ii	Angulo interincisal	135.4°	5.76°
Is-Go-Me	Incisivo inferior al plano Go-Gn	90°	3°

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Trujillo*



*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
A	Punto A
Ago	Antigonal
AGo	Antigonal
B	Punto B
BAR	Borde anterior de la rama
BPR	Borde posterior de la rama
CdI	Condilar inferior
CD	Condilar
Cdp	Condilar posterior
ECdI	Eje condilar inferior
ECdS	Eje condilar superior
Ena	Espina nasal anterior
Enp	Espina nasal posterior
Es	Escotadura signoidea
Go	Gonion
Is	Incisivo superior
Me	Mentón
Mx	Maxilar
N	Nasión

*Puntos cefalométricos (continuación).*



<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
Or	Orbital
Pmi	Prominencia malar inferior
Pmm	Prominencia malar media
Pms	Prominencia malar superior
Po	Pori6n
sEna	Subespinal
sGo	Supragoni6n
sOr	Supra orbital

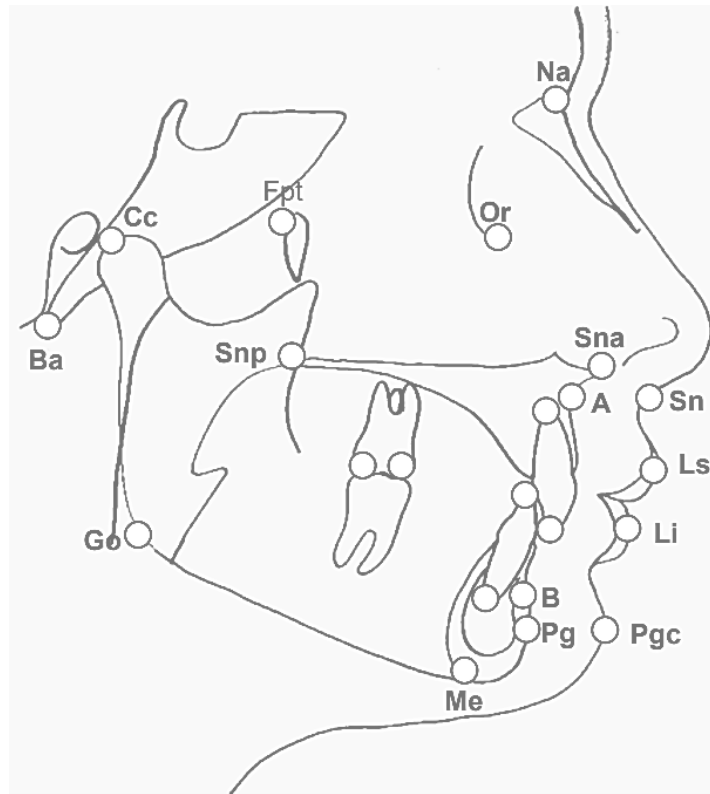
*Relaciones 6seas*

<b>Acr6nimo</b>	<b>Relaci6n 6sea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviaci6n estandar</b>
Na-FH	Proyecci6n Maxilar	90°	3°
PMx-FH	Inclinaci6n maxilar	1°	3.5°
MX-Vpt	Posici6n media maxilar (anteroposterior)	30mm	3mm
Mx-FH	Posici6n media maxilar (supero inferior)	30mm	3mm
Ena-Enp	dimensi6n maxilar anteroposterior	59mm	3mm
I-PMx	Angulaci6n del incisivo superior	109°	3°
<u>1</u> -FH	Angulaci6n del incisivo superior	110°	3°
<u>1</u> Na	Angulaci6n cl6nica del incisivo superior	22°	3°
6d-VPt	Posici6n mesiodistal del primer molar	16mm	1mm
6f-FH	Altura dentoalveolar posterior superior	51mm	2mm
Is-Pmx	Altura dentoalveolar anterior superior	30mm	2mm
Is-FH	Altura dentomaxilar anterior superior	56mm	2mm
NB-FH	Proyecci6n anterior mandibular	88°	2°
Pmm-FH	Inclinaci6n del plano mandibular	22°	8°
I-Pmn	Angulaci6n del incisivo inferior	91°	5°
I-NB	Angulaci6n cl6nica del incisivo inferior	20°	3°
Ii-Me	Altura dentoalveolar anterior inferior	44mm	2mm
6f-Pm	Altura dentoalveolar inferior	36mm	2mm
Ago-D	Longitud del cuerpo mandibular	50mm	2mm
BAR-BPR	Ancho de la rama	30mm	3mm
Es-Ago	Altura de la rama	50mm	3mm
Cd-Go-Pv	Inclinaci6n de la rama	5°	3°
<Go	Angulo gonial	125°	5°
Cd-PV	Ubicaci6n anteroposterior de la ATM	30mm	3mm
Cd-FH	Ubicaci6n vertical de la ATM	4mm	1mm
<Ecd-FH	Angulo del c6ndilo	68°	6°
Ecds-ECdi	Longitud Condilar	24mm	2mm
B-Me	Altura del ment6n	21mm	
B-Me/Pog	Proyecci6n del ment6n	6mm	1mm
PMx-PMn	Relaci6n vertical maxilomandibular	25°	10°
ANB	Relaci6n horizontal intermaxilar	2°	2°
Po-FH	Angulo del plano oclusal	8°	3°
I-I	Angulo interincisal	130°	6°
PMS-VPt	Proyecci6n anteroposterior de la prominencia malar superior	41mm	3mm

*Relaciones óseas (continuación)*

PMS-FH	Ubicación vertical de la Pms	1mm	0.2mm
PMM-VPt	Proyección anteroposterior de la PMM	39mm	3mm
Pmm-FH	Ubicación vertical de la prominencia malar media	14mm	1mm
Pmi-VPt	Proyección anteroposterior de la prominencia malar inferior	29mm	-
Pmi-FH	Ubicación vertical de la prominencia malar inferior	24mm	4mm
Pms-Pmi	Dimensión vertical malar	23mm	2mm
Or-VPt	Proyección del reborde infraorbitario	36mm	3mm
Or-SOr	Dimensión vertical de la órbita	37mm	3mm
N-VPt	Proyección anteroposterior de Nasión	50mm	3mm
N-FH	Ubicación vertical de Nasión	29mm	4mm
CdP-N	Profundidad Facial	91mm	3mm
Sor-Me	Altura facial	147mm	3mm

*Puntos cefalométricos y relaciones óseas de Fonseca*



*Puntos cefalométricos*

<b>Acrónimo</b>	<b>Nombre</b>
Cc	Punto Cc
Ba	Basión
Go	Gonión
Fpt	Fractura pterigomaxilar
Snp	Espina nasal posterior
Na	Nasión
Or	Orbital
Sna	Espina nasal anterior
A	Punto A
B	Punto B
Pg	Pogonión
Me	Mentón
Sn	Subnasal
Ls	Labial superior
Li	Labial inferior
Pgc	Pogonión cutáneo

*Relaciones óseas*

<b>Acronimo</b>	<b>Relación ósea</b>	<b>Norma</b>	<b>Desviación estándar</b>
A-B	Relación horizontal entre punto A y B	0 mm	2 mm
A-Snp	Longitud A-Snp	57.5mm	2mm
A-Ba-Fpt	Inclinación maxilar punto A-FPt	3°	5°
B-Fpt	Longitud mandibular del punto B-FPt	50-52 mm	5 mm
B-Pg	Longitud del mentón B-Pg	8 mm	6 mm
Is-(A-B)	Incisivo superior a plano A-B	4 mm	6 mm
Ii-(A-B)	Incisivo inferior a plano A-B	0 mm	4 mm
(Pgc-Li)-(Ls-Sn)	Angulo nasolabial	85°	5°
Ls-Sn	Subnasal a labio superior	3.5 mm	1.5 mm
Li-Sn	Subnasal a labio inferior	-1 mm	1 mm
Sn-Pgc	Subnasal a pogonión cutáneo	-2 mm	2 mm





*Caso de estudio 2, paciente femenino de 20 años.*

**Case 3**

Gender: Female

OSSys v2.0  
Ceph



*Caso de estudio 3, paciente femenino de 34 años.*



*Caso de estudio 4, paciente masculino de 32 años.*





*Caso de estudio 5, paciente masculino de 23 años.*

**Case 6**

Gender: Female

**OSSys v2.0**  
Ceph



*Caso de estudio 6, paciente femenino de 25 años.*

**Case 7**  
Gender: Male

**OSSys v2.0**  
Ceph



*Caso de estudio7, paciente masculino de 33 años.*



*Caso de estudio 8, paciente femenino de 28 años.*



*Caso de estudio 9, paciente femenino de 31 años.*



## Apéndice 3

### Resultados de evaluación del módulo de cefalometría

Resultados y métricas de evaluación para el caso 1 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-1	NOVATOS				EXPERTOS					MT *p3 (novato- experto)	MV *p4 (novato- experto)
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2		
Np-A	2.25	0.42	2.36	0.38	2.35	0.27	2.41	0.32	0.72	0.63	0.81
Co-Gn	120.33	0.52	120.53	0.64	120.00	0.63	120.60	0.37	0.07	0.34	0.83
Co-A	90.17	0.41	90.80	0.82	91.08	0.20	91.37	0.34	0.10	0.01	0.15
Co-A/Co-Gn	30.17	0.41	30.38	1.16	30.00	0.63	30.31	0.55	0.39	0.60	0.89
Ans-Me	75.17	0.75	75.38	0.38	76.00	0.63	76.28	0.54	0.44	0.06	0.06
Po-Or/Go-Me	27.92	0.20	27.64	0.38	27.12	0.58	27.25	0.60	0.70	0.01	0.21
Ba-N/Pt-GnI	-22.17	0.75	-23.24	0.23	-23.50	0.45	-23.76	0.46	0.34	0.01	0.50
Pg-Np	-2.15	0.42	-2.42	0.39	-2.38	0.38	-2.46	0.41	0.74	0.33	0.87
U1-A	4.17	0.41	4.05	0.12	4.13	0.51	4.15	0.43	0.97	0.90	0.60
L1-A	2.67	0.41	2.51	0.19	2.37	0.38	2.39	0.37	0.91	0.22	0.48
TIP	25.8	4.2	5.8	1.0	15.3	3.6	5.4	1.3	-	-	-
TC	26.3	4.8	-	-	19.1	2.3	0.0	0.0	-	-	-
TA	52.1	6.8	5.8	1.0	34.4	5.3	5.4	1.3	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 2 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-2	NOVATOS				EXPERTOS					MT *p3 (novato- experto)	MV *p4 (novato- experto)
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2		
Np-A	3.83	0.61	3.94	0.62	3.55	0.39	3.49	0.33	0.78	0.36	0.15
Co-Gn	108.83	0.75	109.09	0.71	109.58	0.66	109.67	0.81	0.85	0.01	0.21
Co-A	86.20	0.40	86.03	0.17	86.08	0.58	86.19	0.66	0.78	0.70	0.57
Co-A/Co-Gn	26.15	0.54	26.22	0.54	26.25	0.30	26.31	0.37	0.76	0.70	0.75
Ans-Me	68.23	0.26	68.42	0.20	68.33	0.75	68.73	0.25	0.25	0.76	0.06
Po-Or/Go-Me	15.02	19.12	23.04	0.52	23.97	0.80	24.00	0.67	0.93	0.28	0.05
Ba-N/Pt-GnI	-23.87	0.54	-23.96	0.32	-23.85	0.27	-23.88	0.34	0.87	0.95	0.67
Pg-Np	-3.92	0.63	-3.94	0.62	-3.48	0.35	-3.49	0.33	0.97	0.17	0.15
U1-A	8.90	0.59	8.80	0.49	8.62	0.29	8.59	0.28	0.85	0.03	0.36
L1-A	4.15	0.22	4.21	0.26	4.15	0.43	4.16	0.42	0.96	1.00	0.80
TIP	27.6667	4.5	6.7	1.2	16.3	3.6	6.2	1.3	-	-	-
TC	28	5.1	-	-	20.3	2.5	-	-	-	-	-
TA	55.6667	7.0	6.7	1.2	36.7	5.5	6.2	1.3	-	-	-
Cdiag	83%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 3 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-3	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	-2.52	0.31	-2.58	0.39	-2.68	0.33	-2.78	0.38	0.65	0.39	0.40
Co-Gn	91.83	44.06	110.08	0.70	109.63	0.51	110.17	0.57	0.11	0.35	0.80
Co-A	83.67	0.61	83.73	0.53	83.58	0.48	83.70	0.47	0.66	0.80	0.94
Co-A/Co-Gn	25.97	0.64	25.85	0.68	26.33	0.41	26.47	0.21	0.49	0.26	0.06
Ans-Me	68.48	0.39	68.56	0.43	68.10	0.20	68.26	0.35	0.34	0.06	0.22
Po-Or/Go-Me	30.63	0.46	30.66	0.37	29.42	0.92	29.79	0.82	0.48	0.02	0.05
Ba-N/Pt-GnI	-25.00	0.89	-24.85	0.78	-24.77	0.69	-25.03	0.68	0.52	0.62	0.69
Pg-Np	2.42	0.21	2.42	0.22	2.63	0.38	2.58	0.45	0.82	0.25	0.46
U1-A	7.05	0.33	7.09	0.29	6.90	0.21	7.01	0.12	0.27	0.37	0.58
L1-A	7.00	0.26	6.88	0.21	6.87	0.19	6.81	0.26	0.66	0.33	0.60
TIP	18.6667	3.3	4.8	1.0	11.2	2.5	4.5	0.8	-	-	-
TC	31.1667	5.4	-	-	23.0	3.0	-	-	-	-	-
TA	49.8333	6.4	4.8	1.0	34.2	4.8	4.5	0.8	-	-	-
Cdiag	88%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 4 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-4	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	1.32	0.26	1.30	0.24	1.47	0.29	1.46	0.28	0.96	0.37	0.33
Co-Gn	119.70	0.69	119.69	0.69	119.72	0.43	119.72	0.43	0.99	0.96	0.93
Co-A	90.60	1.10	90.59	1.10	91.05	0.59	91.03	0.60	0.97	0.40	0.41
Co-A/Co-Gn	27.92	0.76	27.80	0.61	28.52	0.39	28.52	0.38	1.00	0.12	0.06
Ans-Me	66.08	0.32	66.06	0.33	66.20	0.20	66.19	0.21	0.96	0.47	0.40
Po-Or/Go-Me	20.57	0.50	20.56	0.52	20.17	0.87	20.14	0.88	0.96	0.35	0.34
Ba-N/Pt-GnI	-19.40	0.89	-19.39	0.89	-19.72	0.33	-19.71	0.33	0.98	0.43	0.42
Pg-Np	1.57	0.45	1.56	0.45	1.57	0.40	1.57	0.42	1.00	1.00	0.97
U1-A	2.28	0.25	2.30	0.25	2.38	0.26	2.39	0.27	0.95	0.51	0.53
L1-A	-1.60	0.27	-1.57	0.27	-1.32	0.39	-1.31	0.39	0.99	0.17	0.21
TIP	13.5	2.3	3.8	1.0	8.2	1.6	3.7	0.5	-	-	-
TC	35.1667	6.0	-	-	26.2	3.3	-	-	-	-	-
TA	48.6667	6.3	3.8	1.0	34.3	4.3	3.7	0.5	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.



Resultados y métricas de evaluación para el caso 5 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-5	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	7.15	0.46	7.15	0.46	7.65	0.42	7.72	0.30	0.76	0.08	0.10
Co-Gn	112.73	0.91	112.75	0.92	113.20	0.62	113.21	0.64	0.98	0.32	0.33
Co-A	90.13	0.99	90.13	0.98	91.10	0.93	91.12	0.91	0.97	0.11	0.10
Co-A/Co-Gn	21.45	1.05	21.45	1.03	22.42	0.48	22.42	0.46	0.99	0.07	0.15
Ans-Me	65.10	0.30	65.10	0.30	65.47	0.94	65.45	0.93	0.98	0.38	0.40
Po-Or/Go-Me	24.05	0.75	24.05	0.75	23.75	0.43	23.74	0.43	0.97	0.42	0.40
Ba-N/Pt-GnI	-18.88	0.86	-18.87	0.83	-19.70	0.79	-19.70	0.77	1.00	0.12	0.10
Pg-Np	-7.28	0.57	-7.28	0.56	-7.58	0.40	-7.57	0.39	0.96	0.31	0.32
U1-A	12.67	0.52	12.68	0.51	12.25	0.26	12.26	0.23	0.96	0.11	0.09
L1-A	9.25	0.25	9.25	0.25	9.03	0.27	9.06	0.24	0.88	0.18	0.20
TIP	12.5	2.3	3.8	1.0	7.8	1.2	3.7	0.5	-	-	-
TC	38.1667	6.6	-	-	28.3	3.6	-	-	-	-	-
TA	50.6667	6.8	3.8	1.0	36.2	4.2	3.7	0.5	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 6 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-6	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	3.00	0.63	2.74	0.46	3.50	0.55	3.47	0.32	0.90	0.17	0.08
Co-Gn	111.50	1.64	111.62	1.42	110.50	0.84	110.67	0.69	0.70	0.21	0.17
Co-A	77.83	1.17	77.86	0.89	77.17	0.41	76.94	0.40	0.36	0.22	0.06
Co-A/Co-Gn	33.83	0.75	33.92	0.64	33.83	0.98	33.90	0.77	0.90	1.00	0.95
Ans-Me	70.67	0.82	70.81	0.77	70.33	0.82	70.30	0.70	0.95	0.50	0.26
Po-Or/Go-Me	23.33	0.82	23.31	0.67	23.33	1.21	23.38	1.15	0.95	1.00	0.90
Ba-N/Pt-GnI	-20.67	0.82	-20.77	0.62	-20.83	1.17	-20.90	1.25	0.92	0.78	0.83
Pg-Np	1.67	0.52	1.51	0.40	1.17	0.41	1.37	0.20	0.30	0.09	0.45
U1-A	8.17	0.75	8.04	0.65	8.33	0.52	8.37	0.32	0.88	0.66	0.28
L1-A	7.67	0.82	7.75	0.61	8.00	0.00	8.07	0.19	0.36	0.34	0.24
TIP	7.83333	1.2	2.5	0.5	5.2	0.8	2.7	0.5	-	-	-
TC	45	7.9	-	-	33.5	3.9	-	-	-	-	-
TA	52.8333	7.9	2.5	0.5	38.7	4.3	2.7	0.5	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 7 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-7	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	3.50	0.55	3.49	0.56	3.50	0.55	3.51	0.31	0.97	1.00	0.95
Co-Gn	110.33	1.21	110.18	1.06	109.83	0.41	109.87	0.46	0.89	0.36	0.52
Co-A	86.67	1.03	86.63	0.74	86.50	0.84	86.32	0.74	0.70	0.77	0.49
Co-A/Co-Gn	23.83	0.41	24.06	0.39	24.00	0.63	23.88	0.66	0.76	0.60	0.59
Ans-Me	66.17	0.41	66.33	0.27	66.17	0.41	66.18	0.35	0.95	1.00	0.44
Po-Or/Go-Me	29.33	0.82	29.26	0.62	29.17	0.75	29.24	0.47	0.85	0.72	0.94
Ba-N/Pt-GnI	-22.83	0.75	-22.80	0.67	-22.67	0.52	-22.78	0.56	0.71	0.66	0.96
Pg-Np	-3.83	0.75	-3.83	0.67	-3.50	1.05	-3.51	1.04	0.99	0.54	0.55
U1-A	9.83	0.41	9.82	0.29	10.00	0.63	10.06	0.48	0.85	0.60	0.32
L1-A	8.50	0.55	8.58	0.29	9.00	0.00	9.06	0.19	0.47	0.05	0.10
TIP	5.5	0.8	2.0	0.0	3.8	0.4	2.0	0.0	-	-	-
TC	63.5	11.2	-	-	47.2	5.4	-	-	-	-	-
TA	69	11.3	2.0	0.0	51.0	5.4	2.0	0.0	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 8 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-8	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	1.12	0.44	1.02	0.60	1.02	0.04	0.80	0.35	0.17	0.59	0.46
Co-Gn	106.50	0.55	106.38	0.49	106.00	0.63	106.10	0.52	0.78	0.17	0.36
Co-A	83.33	0.52	83.42	0.60	83.33	1.03	83.39	0.82	0.92	1.00	0.93
Co-A/Co-Gn	23.33	0.82	23.12	0.83	23.50	0.84	23.54	0.83	0.93	0.73	0.40
Ans-Me	63.17	0.41	63.28	0.44	63.17	0.41	63.28	0.41	0.63	1.00	0.99
Po-Or/Go-Me	26.50	0.55	26.39	0.49	26.00	0.63	25.92	0.50	0.82	0.17	0.14
Ba-N/Pt-GnI	-21.67	0.52	-21.77	0.39	-21.67	0.82	-21.82	0.70	0.74	1.00	0.88
Pg-Np	-1.20	0.40	-1.19	0.50	-1.12	0.49	-0.90	0.75	0.57	0.75	0.46
U1-A	7.17	0.41	7.41	0.32	7.33	0.52	7.61	0.46	0.35	0.55	0.40
L1-A	6.67	0.82	6.70	0.49	7.00	0.00	6.84	0.31	0.24	0.34	0.55
TIP	6.5	0.8	3.0	0.0	4.8	0.4	3.0	0.0	-	-	-
TC	67.3333	11.9	-	-	50.2	5.4	-	-	-	-	-
TA	73.8333	12.1	3.0	0.0	55.0	5.4	3.0	0.0	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 9 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-9	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	0.65	0.50	0.63	0.33	0.67	0.52	0.73	0.22	0.80	0.96	0.57
Co-Gn	111.50	0.55	111.34	0.44	110.67	0.82	110.68	0.75	0.98	0.06	0.40
Co-A	80.17	0.75	80.06	0.68	79.67	0.52	79.93	0.63	0.45	0.21	0.73
Co-A/Co-Gn	31.33	0.52	30.95	0.56	31.00	1.10	30.75	0.97	0.69	0.52	0.68
Ans-Me	76.67	0.82	76.64	0.82	76.67	0.52	76.70	0.47	0.90	1.00	0.88
Po-Or/Go-Me	35.50	1.05	35.45	0.91	35.50	1.22	35.44	1.08	0.93	1.00	0.99
Ba-N/Pt-GnI	-25.33	0.82	-25.36	0.76	-25.00	0.63	-24.85	0.75	0.71	0.45	0.26
Pg-Np	-0.83	0.75	-0.80	0.50	-0.67	0.52	-0.73	0.22	0.80	0.66	0.75
U1-A	7.83	0.75	7.75	0.65	8.00	0.00	8.08	0.19	0.32	0.60	0.26
L1-A	5.33	0.82	5.26	0.65	5.67	0.52	5.60	0.22	0.79	0.42	0.25
TIP	6.5	0.8	3.0	0.0	4.8	0.4	3.0	0.0	-	-	-
TC	54.1667	9.6	-	-	40.5	4.4	-	-	-	-	-
TA	60.6667	9.8	3.0	0.0	45.3	4.4	3.0	0.0	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 10 empleando el método de análisis cefalométrico de McNamara.

CASO-10	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
Np-A	1.65	0.54	1.79	0.51	1.83	0.41	1.95	0.29	0.58	0.52	0.51
Co-Gn	101.00	0.63	101.03	0.57	101.00	0.63	101.10	0.64	0.79	1.00	0.84
Co-A	79.17	0.41	79.24	0.35	78.00	0.89	78.01	0.55	0.98	0.02	0.20
Co-A/Co-Gn	27.00	0.63	27.12	0.57	27.00	0.63	26.76	0.40	0.44	1.00	0.23
Ans-Me	63.00	0.63	62.90	0.41	62.50	0.55	62.56	0.46	0.85	0.17	0.20
Po-Or/Go-Me	25.17	0.75	25.29	0.77	24.83	0.41	25.06	0.36	0.33	0.36	0.52
Ba-N/Pt-GnI	-24.17	0.41	-24.09	0.38	-23.67	1.03	-23.73	0.88	0.91	0.30	0.38
Pg-Np	-1.83	0.41	-1.79	0.51	-2.00	0.00	-2.12	0.27	0.31	0.34	0.19
U1-A	9.83	0.75	9.81	0.60	9.67	0.52	9.87	0.55	0.52	0.66	0.86
L1-A	6.17	0.41	6.25	0.25	6.33	0.52	6.16	0.44	0.55	0.55	0.67
TIP	5.5	0.8	3.0	0.0	3.8	0.4	3.0	0.0	-	-	-
TC	39.6667	6.9	-	-	29.5	3.3	-	-	-	-	-
TA	45.1667	7.1	3.0	0.0	33.3	3.3	3.0	0.0	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 1 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-1	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	85.17	0.75	85.12	0.79	84.17	0.41	84.19	0.39	0.92	0.02	0.30
SNB	78.33	0.52	78.34	0.39	78.83	0.41	78.66	0.13	0.36	0.09	0.80
ANB	6.83	0.75	6.79	0.58	5.67	0.52	5.53	0.39	0.61	0.01	0.10
SND	75.50	0.84	75.33	0.46	75.17	0.41	75.40	0.15	0.21	0.40	0.73
SL	45.50	0.84	45.44	1.10	46.33	0.82	46.39	0.69	0.90	0.11	0.10
SE	17.67	1.86	17.66	1.93	18.67	1.03	18.69	1.01	0.96	0.28	0.27
SN-Go-Gn	34.33	0.82	34.31	0.83	34.83	0.75	34.85	0.67	0.96	0.30	0.24
Pocc-SN	10.67	0.82	10.63	0.84	10.83	1.17	10.75	0.79	0.88	0.78	0.81
NA-(Isi-Isa)	13.17	0.41	13.05	0.41	13.33	0.52	13.44	0.48	0.71	0.55	0.16
Isi-NA	2.33	0.82	1.91	1.11	3.67	0.52	3.65	0.43	0.95	0.01	0.10
(Ans-Pns)-(Isi-Isa)	72.75	2.86	73.01	2.74	70.33	2.50	71.09	2.67	0.63	0.15	0.25
SN-(Isi-Isa)	97.83	0.75	97.84	0.57	97.67	0.52	97.47	0.47	0.50	0.66	0.24
NB-(Iii-Iia)	26.17	2.14	26.24	2.18	28.33	1.97	28.11	2.15	0.85	0.10	0.17
Iii-NB	-7.17	1.33	-6.93	1.24	-7.33	1.03	-7.41	1.08	0.90	0.81	0.49
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	93.33	3.01	93.59	2.90	94.50	2.51	94.59	2.62	0.95	0.48	0.55
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	130.00	0.89	130.09	0.86	130.17	0.41	130.09	0.46	0.77	0.69	0.99
Ac-Pog	-2.33	1.63	-2.47	1.86	-2.92	0.20	-3.15	0.26	0.11	0.41	0.39
TIP	25.8	4.2	5.8	1.0	15.3	3.6	5.4	1.3	-	-	-
TC	26.3	4.8	-	-	19.1	2.3	0.0	0.0	-	-	-
TA	52.1	6.8	5.8	1.0	34.4	5.3	5.4	1.3	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 2 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-2	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	82.67	0.52	82.79	0.43	83.50	0.55	83.54	0.53	0.90	0.02	0.20
SNB	77.67	1.37	78.07	0.35	78.17	0.41	78.34	0.34	0.45	0.41	0.21
ANB	4.67	0.52	4.73	0.30	5.17	0.41	5.21	0.41	0.87	0.09	0.50
SND	75.17	0.41	75.33	0.32	75.83	0.41	75.62	0.25	0.30	0.02	0.12
SL	44.08	0.66	44.04	0.70	43.83	1.17	44.12	1.05	0.67	0.66	0.88
SE	17.50	1.38	17.53	1.50	19.17	0.41	19.12	0.35	0.83	0.02	0.12
SN-Go-Gn	32.67	0.52	32.71	0.67	32.50	0.55	32.72	0.54	0.50	0.60	0.98
Pocc-SN	12.33	1.03	12.21	1.17	11.08	0.92	11.01	1.09	0.90	0.05	0.10
NA-(Isi-Isa)	30.50	1.64	30.57	1.64	29.83	0.75	29.85	0.78	0.96	0.39	0.36
Isi-NA	9.17	0.75	9.06	0.50	8.17	0.75	8.29	0.45	0.74	0.04	0.20
(Ans-Pns)-(Isi-Isa)	62.50	2.07	62.40	2.05	62.33	0.52	62.37	0.52	0.90	0.85	0.98
SN-(Isi-Isa)	112.33	1.51	113.36	1.69	113.33	0.52	113.40	0.68	0.86	0.15	0.96
NB-(Iii-Iia)	31.83	0.75	31.85	0.68	30.83	0.41	30.75	0.37	0.72	0.02	0.10
Iii-NB	-6.83	0.41	-7.06	0.19	-7.10	0.24	-7.17	0.30	0.68	0.20	0.46
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	101.08	1.36	101.07	1.42	99.67	0.52	99.69	0.38	0.92	0.04	0.90
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	111.83	0.98	111.69	0.90	111.67	1.63	111.69	1.49	0.98	0.83	0.90
Ac-Pog	-3.08	0.66	-3.28	0.24	-3.17	0.41	-3.21	0.36	0.86	0.80	0.68
TIP	27.1	4.4	6.1	1.1	16.1	3.8	5.7	1.4	-	-	-
TC	27.6	5.1	-	-	20.0	2.4	-	-	-	-	-
TA	54.7	7.2	6.1	1.1	36.1	5.6	5.7	1.4	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 3 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-3	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	80.08	0.66	80.05	0.70	80.00	0.89	80.11	0.82	0.82	0.86	0.89
SNB	76.00	0.63	76.05	0.63	76.17	0.98	76.29	0.86	0.82	0.73	0.58
ANB	4.08	0.20	4.01	0.18	3.67	0.52	3.82	0.45	0.60	0.10	0.37
SND	73.00	0.63	73.06	0.66	72.83	0.75	72.96	0.75	0.78	0.69	0.80
SL	40.33	1.51	40.54	1.59	40.83	1.83	40.78	1.70	0.96	0.62	0.80
SE	14.67	1.51	14.73	1.78	16.08	0.66	16.12	0.50	0.92	0.06	0.10
SN-Go-Gn	35.67	1.51	35.41	1.54	35.50	1.38	35.49	1.13	0.99	0.85	0.91
Pocc-SN	15.00	0.89	15.11	0.67	15.67	1.21	15.78	1.06	0.87	0.30	0.22
NA-(Isi-Isa)	21.33	1.97	21.27	2.01	22.17	2.64	22.31	2.69	0.93	0.55	0.46
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	5.83	0.41	5.64	0.23	5.50	0.55	5.48	0.21	0.94	0.26	0.25
Isa)	70.33	2.50	70.31	2.36	69.17	3.06	69.24	2.94	0.97	0.49	0.50
SN-(Isi-Isa)	101.33	1.97	101.32	2.08	102.50	2.26	102.43	2.46	0.96	0.36	0.42
NB-(Iii-Iia)	28.00	0.63	28.03	0.79	28.50	1.05	28.46	1.13	0.95	0.34	0.46
Iii-NB (Go-Gn)-(Iii-Iia)	-8.83	0.41	-9.10	0.09	-8.80	0.69	-8.65	0.53	0.68	0.92	0.10
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	96.33	1.21	96.58	1.21	96.67	1.03	96.67	1.14	0.99	0.62	0.89
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	126.67	2.58	126.69	2.80	125.33	3.61	125.41	3.68	0.97	0.48	0.51
Ac-Pog	-0.08	0.49	-0.34	0.29	-0.17	0.41	-0.19	0.37	0.91	0.76	0.46
TIP	28.5	4.6	6.4	1.1	16.9	4.0	5.9	1.4	-	-	-
TC	28.9	5.3	-	-	21.0	2.6	-	-	-	-	-
TA	57.4	7.5	6.4	1.1	37.9	5.8	5.9	1.4	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 4 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-4	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	85.00	1.79	85.02	1.68	86.83	1.72	86.85	1.52	0.99	0.10	0.15
SNB	83.33	1.03	83.49	1.07	84.33	1.03	84.51	1.27	0.79	0.12	0.16
ANB	1.50	0.84	1.52	0.74	2.58	0.66	2.33	0.30	0.42	0.03	0.50
SND	81.33	1.51	81.27	1.30	82.33	1.03	82.17	1.09	0.79	0.21	0.22
SL	62.33	1.63	62.22	1.69	62.50	2.17	62.67	2.09	0.89	0.88	0.69
SE	15.17	1.94	15.34	1.88	18.67	1.03	18.57	0.94	0.86	0.00	0.10
SN-Go-Gn	23.00	1.41	23.08	1.40	22.92	1.11	22.99	1.40	0.92	0.91	0.92
Pocc-SN	6.50	0.84	6.55	0.72	7.33	1.37	7.53	1.40	0.82	0.23	0.16
NA-(Isi-Isa)	17.50	3.51	17.63	3.53	14.17	3.76	14.54	3.74	0.87	0.14	0.17
Isi-NA	2.17	0.98	2.14	0.74	1.50	0.84	1.50	0.56	0.99	0.23	0.12
(Ans-Pns)-(Isi-Isa)	74.17	3.43	74.10	3.25	75.67	3.39	75.66	3.38	1.00	0.46	0.43
SN-(Isi-Isa)	102.67	2.94	102.64	2.98	101.33	2.66	101.39	2.58	0.97	0.43	0.45
NB-(Iii-Iia)	16.75	1.84	16.73	1.97	17.00	1.67	17.03	1.56	0.97	0.81	0.77
Iii-NB	-0.50	0.55	-0.63	0.47	-1.17	0.41	-1.10	0.23	0.73	0.04	0.80
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	160.00	86.69	160.16	86.81	164.50	86.76	164.53	86.83	1.00	0.93	0.93
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	144.00	3.79	144.12	3.66	146.17	4.26	146.09	4.41	0.98	0.37	0.42
Ac-Pog	4.67	0.52	4.65	0.25	4.92	0.20	4.90	0.16	0.85	0.30	0.07
TIP	29.9	4.9	6.8	1.2	17.8	4.2	6.2	1.5	-	-	-
TC	30.4	5.6	-	-	22.1	2.7	-	-	-	-	-
TA	60.3	7.9	6.8	1.2	39.8	6.1	6.2	1.5	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 5 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-5	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	88.17	0.41	87.95	0.39	88.33	0.82	88.25	0.91	0.88	0.66	0.47
SNB	84.83	0.41	84.77	0.31	84.67	0.52	84.87	0.47	0.50	0.55	0.68
ANB	7.33	0.52	7.28	0.37	6.83	0.98	6.88	0.84	0.93	0.30	0.31
SND	80.33	0.52	80.45	0.28	80.50	0.55	80.37	0.38	0.64	0.60	0.67
SL	52.00	0.89	52.07	0.94	52.50	1.52	52.55	1.31	0.96	0.50	0.48
SE	17.83	0.41	17.32	0.61	18.50	0.55	19.05	0.86	0.22	0.04	0.08
SN-Go-Gn	27.67	1.21	27.57	1.11	26.50	1.05	26.46	1.01	0.94	0.10	0.10
Pocc-SN	9.50	1.52	9.56	1.64	9.00	1.26	9.13	1.11	0.85	0.55	0.61
NA-(Isi-Isa)	32.83	1.17	32.51	1.12	32.33	1.75	32.32	1.72	0.99	0.57	0.82
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	9.00	0.63	9.08	0.57	9.33	1.03	9.38	1.11	0.94	0.52	0.57
Isa	52.33	1.21	52.35	1.10	52.17	0.98	52.35	0.96	0.75	0.80	1.00
SN-(Isi-Isa)	124.50	1.05	124.55	0.96	124.00	1.10	124.06	1.16	0.93	0.44	0.44
NB-(Iii-Iia)	39.83	1.94	39.90	1.73	39.67	2.66	39.79	2.21	0.93	0.90	0.93
Iii-NB (Go-Gn)-(Iii-Iia)	-12.83	0.41	-12.57	0.12	-12.33	0.52	-12.40	0.34	0.79	0.09	0.28
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	107.67	2.07	107.56	2.17	108.33	1.75	108.47	1.65	0.89	0.56	0.44
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	100.33	1.37	100.31	1.19	101.17	3.25	101.01	3.20	0.94	0.58	0.63
Ac-Pog	-8.83	0.75	-8.84	0.44	-8.33	0.52	-8.48	0.38	0.58	0.21	0.16
TIP	31.4	5.1	7.1	1.2	18.6	4.4	6.5	1.6	-	-	-
TC	31.9	5.9	-	-	23.2	2.8	-	-	-	-	-
TA	63.3	8.3	7.1	1.2	41.8	6.4	6.5	1.6	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.



Resultados y métricas de evaluación para el caso 6 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-6	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	80.17	0.75	80.15	0.93	79.83	1.33	79.82	1.07	0.99	0.60	0.59
SNB	75.33	0.52	75.45	0.40	75.83	0.41	75.61	0.50	0.41	0.09	0.55
ANB	4.67	0.82	4.70	0.74	4.17	0.41	4.21	0.68	0.89	0.21	0.27
SND	72.67	0.52	72.80	0.28	72.83	0.41	72.85	0.55	0.96	0.55	0.85
SL	34.17	1.17	34.21	1.07	32.50	4.32	32.53	4.27	0.99	0.38	0.37
SE	12.17	2.04	12.20	1.83	12.83	1.60	12.94	1.54	0.91	0.54	0.46
SN-Go-Gn	36.50	1.38	36.53	1.26	36.33	1.37	36.46	1.23	0.87	0.84	0.92
Pocc-SN	18.83	1.17	18.78	1.30	18.50	1.05	18.33	1.03	0.78	0.61	0.52
NA-(Isi-Isa)	24.83	0.98	24.90	0.97	26.00	1.55	25.91	1.76	0.93	0.15	0.25
Isi-NA	16.00	21.57	6.63	1.09	7.00	1.41	6.94	1.25	0.94	0.33	0.66
(Ans-Pns)-(Isi-Isa)	67.17	1.60	67.10	1.59	66.50	1.22	66.53	1.09	0.97	0.44	0.49
SN-(Isi-Isa)	105.00	0.89	105.05	0.97	105.67	1.03	105.73	1.09	0.92	0.26	0.28
NB-(Iii-Iia)	37.83	1.83	37.70	1.98	37.33	1.97	37.43	1.90	0.93	0.66	0.82
Iii-NB	-11.17	0.41	-11.03	0.30	-10.58	1.43	-10.53	1.50	0.95	0.36	0.44
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	105.83	2.14	105.72	2.21	105.33	1.63	105.36	1.71	0.98	0.66	0.76
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	112.67	1.97	112.71	1.83	112.50	1.87	112.45	1.81	0.96	0.88	0.81
Ac-Pog	-2.33	0.82	-2.48	0.55	-2.17	0.41	-2.22	0.29	0.80	0.66	0.33
TIP	33.0	5.4	7.4	1.3	19.6	4.6	6.9	1.6	-	-	-
TC	33.5	6.1	-	-	24.4	3.0	-	-	-	-	-
TA	66.5	8.7	7.4	1.3	43.9	6.8	6.9	1.6	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 7 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-7	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	85.50	0.55	85.21	0.46	84.17	1.47	84.19	1.41	0.98	0.06	0.12
SNB	76.17	1.33	77.21	0.23	77.33	0.52	77.18	0.42	0.58	0.07	0.85
ANB	7.78	0.85	7.99	0.27	7.00	1.26	7.02	1.40	0.98	0.24	0.12
SND	74.00	0.00	74.02	0.23	73.83	0.41	73.94	0.39	0.67	0.34	0.65
SL	41.17	0.75	41.22	0.59	41.33	0.82	41.16	1.03	0.75	0.72	0.90
SE	13.67	1.97	13.87	1.93	14.33	0.82	14.27	0.49	0.87	0.46	0.63
SN-Go-Gn	36.67	0.82	36.45	0.86	36.33	0.52	36.35	0.67	0.97	0.42	0.82
Pocc-SN	19.50	0.84	19.63	0.73	20.00	1.26	20.10	1.06	0.89	0.44	0.39
NA-(Isi-Isa)	24.17	2.23	24.31	2.16	25.17	4.07	25.28	3.87	0.96	0.61	0.60
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	5.33	0.52	5.15	0.52	6.67	1.97	6.38	1.97	0.81	0.14	0.17
Isa	60.50	1.76	60.36	1.72	60.17	2.32	60.23	2.26	0.96	0.78	0.91
SN-(Isi-Isa)	109.17	1.47	109.52	1.98	109.50	2.81	109.47	2.63	0.99	0.80	0.97
NB-(Iii-Iia)	44.50	1.22	44.54	1.08	44.58	1.02	44.61	1.18	0.96	0.90	0.91
Iii-NB (Go-Gn)-(Iii-Iia)	-12.50	0.55	-12.58	0.21	-12.67	0.52	-12.62	0.26	0.85	0.60	0.75
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	110.83	1.72	110.87	1.68	111.17	1.47	111.09	1.60	0.93	0.73	0.82
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	103.17	3.25	103.16	2.92	103.33	2.94	103.09	2.95	0.89	0.93	0.97
Ac-Pog	-3.83	0.41	-3.72	0.26	-3.50	0.55	-3.52	0.31	0.95	0.26	0.24
TIP	34.6	5.6	7.8	1.3	20.5	4.8	7.2	1.7	-	-	-
TC	35.2	6.5	-	-	25.6	3.1	-	-	-	-	-
TA	69.8	9.2	7.8	1.3	46.1	7.1	7.2	1.7	-	-	-
Cdiag	88%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 8 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-8	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	81.17	1.17	81.20	0.93	81.17	0.98	81.13	0.79	0.95	1.00	0.90
SNB	75.83	0.41	75.75	0.21	75.67	0.52	75.89	0.39	0.41	0.55	0.44
ANB	5.50	0.84	5.45	0.89	5.33	0.82	5.24	0.60	0.82	0.73	0.64
SND	72.50	0.55	72.99	0.26	72.83	0.41	72.89	0.37	0.80	0.26	0.61
SL	36.33	0.52	36.02	0.46	36.50	1.05	36.47	0.91	0.96	0.73	0.30
SE	19.67	1.21	19.49	1.01	20.67	0.52	20.64	0.49	0.92	0.09	0.32
SN-Go-Gn	34.83	0.41	35.00	0.26	34.67	0.52	34.66	0.61	0.98	0.55	0.23
Pocc-SN	17.17	0.41	17.20	0.42	17.33	1.21	17.26	1.11	0.91	0.76	0.91
NA-(Isi-Isa)	29.00	2.10	29.02	2.06	30.00	1.10	29.93	1.12	0.91	0.33	0.37
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	7.17	0.98	7.08	1.04	7.00	0.89	7.32	0.91	0.55	0.77	0.67
Isa	62.00	1.41	62.11	1.31	59.50	2.26	59.44	1.97	0.96	0.04	0.21
SN-(Isi-Isa)	109.67	0.82	109.73	0.72	111.50	1.97	111.40	1.84	0.93	0.06	0.17
NB-(Iii-Iia)	37.50	1.38	37.50	1.28	37.67	0.82	37.69	0.68	0.97	0.80	0.76
Iii-NB (Go-Gn)-(Iii-Iia)	-9.67	0.82	-9.81	0.31	-9.83	0.41	-9.78	0.37	0.83	0.66	0.89
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	106.67	1.21	106.75	1.44	107.83	1.33	107.80	1.54	0.97	0.14	0.25
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	109.17	0.75	109.19	0.79	108.00	2.61	108.15	2.53	0.92	0.32	0.36
Ac-Pog	-4.33	0.52	-4.61	0.64	-4.50	0.55	-4.65	0.31	0.57	0.60	0.89
TIP	36.4	5.9	8.2	1.4	21.6	5.1	7.6	1.8	-	-	-
TC	36.9	6.8	-	-	26.9	3.3	-	-	-	-	-
TA	73.3	9.6	8.2	1.4	48.4	7.5	7.6	1.8	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 9 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-9	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	78.50	0.55	78.47	0.63	77.67	0.52	77.81	0.50	0.64	0.02	0.70
SNB	72.33	0.52	72.42	0.45	72.17	0.41	72.12	0.36	0.82	0.55	0.23
ANB	6.17	0.41	6.05	0.52	5.67	0.82	5.69	0.66	0.96	0.21	0.32
SND	70.00	0.63	70.07	0.34	69.50	0.55	69.55	0.42	0.86	0.17	0.46
SL	28.17	0.98	28.38	1.07	28.00	0.63	28.01	0.62	0.97	0.73	0.48
SE	16.50	1.38	16.49	1.37	17.67	0.82	17.76	0.80	0.85	0.10	0.12
SN-Go-Gn	45.33	1.03	45.35	0.94	45.83	0.75	45.90	0.75	0.88	0.36	0.29
Pocc-SN	16.17	1.47	16.28	1.36	17.00	0.89	16.89	1.08	0.85	0.26	0.41
NA-(Isi-Isa)	27.50	0.84	27.48	0.83	26.83	1.17	26.69	1.33	0.85	0.28	0.24
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	7.83	0.41	7.68	0.60	8.00	0.63	8.13	0.64	0.74	0.60	0.23
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	67.50	0.84	67.60	0.70	68.33	1.75	68.44	1.73	0.92	0.32	0.30
SN-(Isi-Isa)	105.83	1.17	105.95	1.19	104.33	1.63	104.50	1.68	0.87	0.10	0.12
NB-(Iii-Iia)	30.50	0.55	30.50	0.54	31.00	1.26	31.21	1.24	0.77	0.40	0.23
Iii-NB	-9.50	0.55	-9.37	0.24	-9.17	0.41	-9.36	0.20	0.31	0.26	0.97
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	92.50	1.05	92.73	0.98	93.17	0.98	93.20	1.10	0.96	0.28	0.46
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	115.83	1.17	115.96	1.13	116.17	2.14	116.41	1.94	0.84	0.74	0.64
Ac-Pog	-1.67	0.52	-1.92	0.36	-1.83	0.41	-2.05	0.21	0.27	0.55	0.44
TIP	38.2	6.2	8.6	1.5	22.7	5.3	8.0	1.9	-	-	-
TC	38.8	7.1	-	-	28.2	3.4	-	-	-	-	-
TA	77.0	10.1	8.6	1.5	50.8	7.8	8.0	1.9	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Apéndice 3.20. Resultados y métricas de evaluación para el caso 10 empleando el método de análisis cefalométrico de Steiner.

CASO-10	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
SNA	79.67	1.03	79.89	1.28	80.50	0.55	80.55	0.33	0.84	0.11	0.25
SNB	77.83	0.41	78.19	0.29	78.33	0.52	78.44	0.23	0.66	0.09	0.14
ANB	1.67	1.03	1.69	1.10	2.17	0.41	2.12	0.35	0.82	0.30	0.39
SND	74.17	0.41	74.17	0.25	73.67	0.82	74.03	0.25	0.32	0.21	0.36
SL	42.00	0.89	42.00	0.81	42.33	0.52	42.44	0.40	0.71	0.45	0.27
SE	11.50	1.22	11.40	1.19	12.17	0.75	12.22	0.58	0.90	0.28	0.16
SN-Go-Gn	34.17	0.75	33.94	0.74	34.00	0.63	34.09	0.80	0.84	0.69	0.75
Pocc-SN	14.83	2.23	14.68	2.13	14.50	2.88	14.53	3.11	0.99	0.83	0.92
NA-(Isi-Isa)	31.00	1.10	30.86	1.09	30.83	0.75	31.02	0.89	0.70	0.77	0.79
Isi-NA (Ans-Pns)-(Isi-Isa)	9.33	1.51	9.39	1.53	8.83	0.75	8.75	0.53	0.83	0.48	0.36
SN-(Isi-Isa)	60.33	1.21	60.08	1.12	59.67	0.52	59.61	0.59	0.87	0.24	0.39
NB-(Iii-Iia)	110.67	1.21	110.75	1.01	111.83	0.75	111.57	0.61	0.53	0.07	0.12
Iii-NB	32.67	0.82	32.58	0.84	33.17	1.17	33.15	1.29	0.98	0.41	0.39
(Go-Gn)-(Iii-Iia)	-6.83	0.41	-7.25	0.18	-6.67	0.82	-7.12	0.22	0.22	0.66	0.28
(Isi-Isa)-(Iii-Iia)	100.50	1.05	100.45	1.18	100.67	1.97	100.62	1.87	0.97	0.86	0.85
Ac-Pog	114.83	1.17	114.87	1.24	113.83	1.47	113.72	1.73	0.90	0.22	0.22
TIP	-5.33	0.52	-5.25	0.45	-4.83	0.41	-5.10	0.26	0.21	0.09	0.48
TIP	40.1	6.5	9.0	1.6	23.8	5.6	8.4	2.0	-	-	-
TC	40.7	7.5	-	-	29.6	3.6	-	-	-	-	-
TA	80.8	10.6	9.0	1.6	53.4	8.2	8.4	2.0	-	-	-
Cdiag	92%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 1 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-1	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.33	1.03	-2.58	1.16	-3.17	0.98	-3.22	0.83	0.91	0.18	0.29
Isi-Iii	5.00	1.10	4.91	1.29	4.33	1.03	4.21	0.97	0.84	0.30	0.32
Isi-Iii	3.67	1.51	3.77	1.39	3.50	0.55	3.49	0.57	0.97	0.80	0.65
Iii-Pocc	1.17	0.41	1.37	0.43	0.50	0.55	0.48	0.32	0.93	0.04	0.40
U3-L3	4.17	2.71	4.25	2.79	3.17	2.64	2.96	2.52	0.89	0.53	0.42
Isi-Isa/Iii-Iia	130.67	0.82	132.24	3.24	128.67	3.08	127.80	2.99	0.63	0.15	0.30
A-(N-Pg)	6.83	0.98	6.99	0.83	4.83	0.41	4.79	0.27	0.82	0.00	0.19
Ans-XIPm	50.17	1.17	50.07	0.96	50.33	0.52	50.36	0.60	0.94	0.76	0.55
U6-Pt	27.00	1.79	27.09	1.67	27.83	0.75	27.96	0.79	0.77	0.32	0.27
Iii-(A-Pg)	2.17	0.41	2.18	1.24	4.33	1.21	4.45	1.04	0.86	0.00	0.18
Isi-(A-Pg)	7.33	0.82	7.48	0.78	8.83	0.41	8.92	0.36	0.70	0.00	0.10
Isi-Isa/A-Pg	26.67	1.86	26.43	1.98	27.00	2.97	27.20	2.86	0.91	0.82	0.60
Iii-Iia/A-Pg	22.50	1.76	22.83	2.16	25.50	2.43	25.00	2.77	0.75	0.03	0.16
XI-Pocc	7.67	1.37	7.57	1.48	7.33	1.21	7.30	1.24	0.96	0.66	0.74
Li-(Pn-Pog)	1.17	0.41	1.03	0.35	0.67	0.52	0.62	0.41	0.85	0.09	0.09
Ans-St	29.00	0.63	29.03	0.50	28.33	0.52	28.49	0.64	0.65	0.07	0.14
St-Pocc	6.33	1.51	6.46	1.47	6.83	0.98	6.79	0.80	0.94	0.51	0.63
Po-Or/N-Pg	88.17	1.33	88.05	1.18	30.00	92.57	30.00	92.52	1.00	0.15	0.16
Ba-Na/Pt-GnI	86.00	0.63	85.75	0.71	85.83	0.98	85.79	0.71	0.93	0.73	0.93
Go-Me/Po-Or	25.50	2.59	25.73	2.52	25.67	1.03	25.76	0.95	0.87	0.89	0.97
N-Cf-A	57.17	1.33	57.31	1.38	58.50	0.55	58.73	0.51	0.47	0.05	0.47
Po-Or/N-A	95.50	1.97	95.59	1.92	94.83	0.41	94.92	0.31	0.69	0.44	0.42
Po-Or/Ans-Pns	3.33	2.34	3.36	2.14	4.17	0.75	4.29	0.64	0.77	0.43	0.33
Ba-N/Po-Or	27.33	2.07	27.44	2.38	28.67	1.03	28.67	0.83	0.99	0.19	0.26
Cc-N	53.83	0.75	53.97	0.63	53.50	0.84	53.53	0.39	0.93	0.48	0.18
Cd-XI/XI-Pm	-32.33	2.16	-32.59	2.16	-31.67	1.21	-31.65	1.25	0.98	0.52	0.38
XI-Pm	72.50	0.84	72.54	0.89	72.33	0.52	72.35	0.77	0.97	0.69	0.70
Po-Pt	44.67	0.82	44.64	0.62	44.00	0.63	44.01	0.50	0.98	0.14	0.08
GoI-Cf	70.50	1.05	70.52	1.27	68.33	2.16	68.40	2.19	0.96	0.05	0.07
Po-Or/Cf-XI	72.17	2.14	72.32	2.07	73.50	1.22	73.42	1.34	0.92	0.21	0.30
TIP	25.8	4.2	5.8	1.0	15.3	3.6	5.4	1.3	-	-	-
TC	26.3	4.8	-	-	19.1	2.3	0.0	0.0	-	-	-
TA	52.1	6.8	5.8	1.0	34.4	5.3	5.4	1.3	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 2 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-2	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.00	0.89	-2.14	0.98	-2.67	0.52	-2.78	0.56	0.73	0.14	0.20
Isi-Iii	8.67	0.52	8.48	0.30	8.33	0.52	8.45	0.19	0.63	0.29	0.80
Isi-Iii	1.92	0.20	2.15	0.27	2.33	0.52	2.27	0.36	0.81	0.10	0.53
Iii-Pocc	0.50	0.55	0.33	0.22	0.33	0.52	0.27	0.29	0.80	0.60	0.72
U3-L3	0.33	3.33	0.19	3.35	2.00	5.06	2.06	4.93	0.98	0.52	0.46
Isi-Isa/Iii-Iia	104.83	0.75	104.92	0.53	103.83	1.17	103.83	1.05	1.00	0.11	0.80
A-(N-Pg)	4.67	0.52	4.68	0.27	3.83	0.75	3.75	0.58	0.83	0.05	0.10
Ans-XIPm	46.67	1.03	46.74	0.90	47.00	1.67	47.04	1.54	0.97	0.69	0.70
U6-Pt	24.67	0.82	24.81	0.78	25.75	2.09	25.61	2.08	0.91	0.26	0.40
Iii-(A-Pg)	3.83	0.41	3.85	0.29	3.75	0.42	4.13	0.49	0.18	0.73	0.25
Isi-(A-Pg)	12.67	0.52	12.57	0.15	12.75	0.42	12.82	0.51	0.81	0.77	0.28
Isi-Isa/A-Pg	42.17	3.60	41.95	3.84	40.50	2.26	40.51	2.09	0.99	0.36	0.44
Iii-Iia/A-Pg	26.67	1.03	26.63	0.84	27.50	1.22	27.49	0.96	0.99	0.23	0.13
XI-Pocc	8.00	0.63	8.19	0.69	8.67	1.51	8.50	1.30	0.84	0.34	0.62
Li-(Pn-Pog)	2.17	0.41	2.00	0.24	2.08	0.49	1.86	0.14	0.30	0.76	0.22
Ans-St	23.17	0.41	23.42	0.40	24.00	0.63	24.01	0.69	0.98	0.02	0.10
St-Pocc	10.83	0.41	10.93	0.32	11.17	0.75	11.24	0.75	0.87	0.36	0.38
Po-Or/N-Pg	88.83	0.41	89.17	0.13	88.67	1.03	89.25	0.58	0.26	0.72	0.75
Ba-Na/Pt-GnI	84.50	0.55	84.49	0.59	85.00	0.63	84.83	0.52	0.63	0.17	0.31
Go-Me/Po-Or	24.00	0.89	24.16	0.97	23.83	0.75	24.13	0.50	0.45	0.73	0.93
N-Cf-A	52.50	0.84	52.70	0.32	52.83	1.17	52.69	1.16	0.83	0.58	0.98
Po-Or/N-A	94.17	0.41	94.03	0.29	93.17	0.98	93.05	0.78	0.83	0.04	0.20
Po-Or/Ans-Pns	6.67	0.52	6.56	0.13	7.00	0.63	6.89	0.75	0.79	0.34	0.31
Ba-N/Po-Or	30.67	0.82	31.04	0.10	30.67	0.82	28.16	6.74	0.39	1.00	0.32
Cc-N	53.17	0.98	53.19	0.77	53.50	0.84	53.44	0.83	0.91	0.54	0.60
Cd-XI/XI-Pm	-32.33	1.03	-32.19	0.83	-32.00	0.89	-31.88	0.74	0.80	0.56	0.51
XI-Pm	66.00	0.89	66.18	0.90	65.50	1.05	65.44	0.98	0.93	0.40	0.21
Po-Pt	40.00	0.63	39.95	0.59	39.33	2.66	39.42	2.68	0.96	0.56	0.65
GoI-Cf	61.67	1.03	61.60	1.08	61.83	0.41	61.97	0.53	0.62	0.72	0.46
Po-Or/Cf-XI	72.83	1.17	72.79	0.97	73.17	0.75	73.17	0.88	1.00	0.57	0.50
TIP	27.1	4.4	6.1	1.1	16.1	3.8	5.7	1.4	-	-	-
TC	27.6	5.1	-	-	20.0	2.4	-	-	-	-	-
TA	54.7	7.2	6.1	1.1	36.1	5.6	5.7	1.4	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 3 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-3	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-3.00	0.63	-2.87	0.42	-3.17	0.75	-3.02	0.52	0.70	0.69	0.60
Isi-Iii	2.33	0.52	2.10	0.32	2.08	0.66	1.88	0.58	0.58	0.48	0.44
Isi-Iii	1.05	0.23	0.93	0.15	0.93	0.22	1.19	0.21	0.06	0.39	0.30
Iii-Pocc	0.25	0.23	0.34	0.16	0.20	0.24	0.44	0.24	0.12	0.72	0.45
U3-L3	-1.33	0.52	-1.45	0.16	-1.67	0.52	-1.52	0.21	0.53	0.29	0.57
Isi-Isa/Iii-Iia	124.83	1.17	124.91	1.13	124.92	1.50	124.80	1.62	0.90	0.92	0.90
A-(N-Pg)	3.67	0.52	3.75	0.63	3.50	1.22	3.39	1.25	0.88	0.77	0.55
Ans-XIPm	51.33	1.03	51.28	0.89	52.50	0.84	52.39	0.54	0.80	0.06	0.34
U6-Pt	23.17	1.17	23.23	1.00	23.83	0.75	23.97	0.71	0.75	0.27	0.17
Iii-(A-Pg)	6.83	0.52	6.86	0.30	6.67	0.82	6.75	0.30	0.81	0.68	0.58
Isi-(A-Pg)	8.87	0.33	9.02	0.09	8.50	0.45	8.72	0.34	0.37	0.14	0.68
Isi-Isa/A-Pg	29.83	0.98	29.94	0.88	30.17	1.33	30.45	1.21	0.71	0.63	0.42
Iii-Iia/A-Pg	25.00	1.41	25.15	1.54	24.67	1.37	24.75	1.13	0.91	0.69	0.62
XI-Pocc	0.50	0.55	0.48	0.55	0.33	0.52	0.40	0.34	0.80	0.60	0.78
Li-(Pn-Pog)	1.25	0.76	1.30	0.47	1.17	0.75	1.33	0.51	0.67	0.85	0.91
Ans-St	24.67	0.82	25.20	0.18	24.92	0.49	25.04	0.50	0.67	0.53	0.49
St-Pocc	7.50	0.84	7.48	0.78	7.67	1.03	7.74	1.08	0.91	0.77	0.64
Po-Or/N-Pg	83.33	0.52	83.27	0.56	83.17	0.75	83.64	0.51	0.23	0.66	0.26
Ba-Na/Pt-GnI	89.17	0.75	89.28	0.63	88.83	0.75	88.61	0.72	0.61	0.46	0.12
Go-Me/Po-Or	30.50	0.84	30.45	0.66	30.17	0.98	30.02	0.76	0.78	0.54	0.32
N-Cf-A	44.83	1.60	44.69	1.76	44.67	1.03	44.82	0.65	0.76	0.83	0.86
Po-Or/N-A	266.83	1.17	266.76	1.27	265.17	4.79	265.20	4.99	0.99	0.43	0.47
Po-Or/Ans-Pns	0.67	0.52	0.65	0.28	0.50	0.84	0.64	0.85	0.78	0.69	0.98
Ba-N/Po-Or	22.33	1.75	22.21	1.76	21.83	4.92	21.77	5.10	0.98	0.82	0.85
Cc-N	53.67	0.82	53.66	1.01	54.33	0.52	54.54	0.60	0.53	0.12	0.19
Cd-XI/XI-Pm	-32.50	2.07	-32.12	2.08	-30.17	1.60	-30.31	1.64	0.88	0.05	0.12
XI-Pm	64.17	0.75	64.04	0.55	64.00	1.67	63.92	1.48	0.94	0.83	0.86
Po-Pt	41.83	0.98	41.97	1.00	42.00	2.61	42.05	2.30	0.97	0.89	0.94
GoI-Cf	62.33	0.82	62.26	0.74	61.67	0.82	61.39	0.74	0.56	0.19	0.17
Po-Or/Cf-XI	71.33	1.63	71.23	1.34	72.33	1.37	72.49	1.36	0.85	0.28	0.14
TIP	28.5	4.6	6.4	1.1	16.9	4.0	5.9	1.4	-	-	-
TC	28.9	5.3	-	-	21.0	2.6	-	-	-	-	-
TA	57.4	7.5	6.4	1.1	37.9	5.8	5.9	1.4	-	-	-
Cdiag	88%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.



Resultados y métricas de evaluación para el caso 4 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-4	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-0.17	1.94	-0.18	2.04	1.17	2.56	1.07	2.50	0.95	0.33	0.37
Isi-Iii	3.67	0.82	3.68	0.48	3.17	0.41	3.25	0.28	0.67	0.21	0.19
Isi-Iii	3.00	0.63	3.19	0.39	2.92	0.20	3.18	0.17	0.40	0.77	0.94
Iii-Pocc	0.83	0.41	0.85	0.41	1.17	0.75	1.16	0.60	0.99	0.36	0.32
U3-L3	1.83	1.94	1.88	1.88	1.33	2.07	1.21	1.95	0.92	0.67	0.56
Isi-Isa/Iii-Iia	146.83	4.88	146.81	4.88	147.00	2.45	147.03	2.34	0.98	0.94	0.92
A-(N-Pg)	0.17	0.75	0.23	0.63	0.33	0.52	0.20	0.32	0.60	0.66	0.93
Ans-XIPm	41.00	0.63	41.03	0.66	26.83	33.24	26.98	33.13	0.99	0.32	0.32
U6-Pt	30.00	1.55	30.15	1.27	32.00	1.90	32.08	1.73	0.94	0.07	0.53
Iii-(A-Pg)	1.67	0.52	1.51	0.23	1.17	0.41	1.24	0.38	0.77	0.09	0.16
Isi-(A-Pg)	2.17	0.41	2.13	0.43	1.83	0.41	1.98	0.41	0.55	0.19	0.54
Isi-Isa/A-Pg	11.50	0.84	11.65	0.75	11.33	1.03	11.37	0.83	0.95	0.77	0.56
Iii-Iia/A-Pg	17.17	1.72	17.05	1.76	17.33	2.42	17.27	2.26	0.96	0.89	0.85
XI-Pocc	3.00	1.41	2.81	1.22	2.50	1.76	2.51	1.67	0.99	0.60	0.72
Li-(Pn-Pog)	7.33	0.52	7.43	0.27	6.83	0.41	7.16	0.11	0.09	0.09	0.40
Ans-St	22.83	0.41	22.96	0.36	22.67	0.82	23.01	0.18	0.34	0.66	0.76
St-Pocc	7.00	0.63	6.89	0.63	6.50	0.55	6.59	0.63	0.79	0.17	0.43
Po-Or/N-Pg	88.83	0.41	88.81	0.39	89.00	0.89	88.84	0.76	0.75	0.69	0.94
Ba-Na/Pt-GnI	-84.67	1.37	-84.62	1.22	-84.83	0.41	-84.60	0.09	0.20	0.78	0.97
Go-Me/Po-Or	20.67	1.37	20.82	1.25	19.50	1.05	19.65	0.86	0.80	0.13	0.09
N-Cf-A	50.50	1.05	50.52	1.24	51.00	0.63	50.73	0.43	0.40	0.34	0.71
Po-Or/N-A	91.33	0.52	91.34	0.52	91.50	1.05	91.38	0.93	0.84	0.73	0.92
Po-Or/Ans-Pns	1.67	0.82	1.68	0.84	2.67	0.52	2.54	0.71	0.73	0.03	0.08
Ba-N/Po-Or	23.67	1.37	23.63	1.26	25.00	0.63	25.07	0.74	0.86	0.06	0.09
Cc-N	56.17	1.47	56.10	1.40	55.67	0.82	55.87	0.53	0.62	0.48	0.71
Cd-XI/XI-Pm	-40.33	0.82	-40.26	0.74	-39.50	1.05	-39.64	0.84	0.81	0.16	0.20
XI-Pm	70.83	0.98	70.85	1.07	70.67	0.52	70.88	0.87	0.61	0.72	0.95
Po-Pt	43.50	0.84	43.48	0.75	43.33	0.52	43.41	0.44	0.78	0.69	0.86
GoI-Cf	66.33	0.52	66.15	0.50	163.83	241.11	163.71	241.34	1.00	0.35	0.35
Po-Or/Cf-XI	74.17	0.98	74.05	0.93	75.33	1.21	75.29	1.09	0.95	0.10	0.16
TIP	29.9	4.9	6.8	1.2	17.8	4.2	6.2	1.5	-	-	-
TC	30.4	5.6	-	-	22.1	2.7	-	-	-	-	-
TA	60.3	7.9	6.8	1.2	39.8	6.1	6.2	1.5	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 5 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-5	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-3.33	1.03	-3.30	1.21	-3.50	0.55	-3.64	0.78	0.74	0.73	0.58
Isi-Iii	5.67	0.82	6.01	0.18	5.83	0.41	6.11	0.27	0.19	0.66	0.44
Isi-Iii	3.83	0.41	4.00	0.33	3.75	0.42	4.14	0.22	0.07	0.73	0.39
Iii-Pocc	1.17	0.75	1.16	0.71	1.18	0.40	1.20	0.39	0.96	0.96	0.91
U3-L3	-1.17	0.41	-1.31	0.26	-1.33	0.52	-1.47	0.29	0.59	0.55	0.35
Isi-Isa/Iii-Iia	102.33	1.03	102.19	1.08	102.50	1.87	102.26	1.84	0.83	0.85	0.94
A-(N-Pg)	7.42	0.66	7.56	0.54	7.67	0.82	-40.16	116.67	0.34	0.57	0.34
Ans-XIPm	42.83	1.47	42.73	1.26	42.33	1.21	42.51	1.20	0.81	0.53	0.76
U6-Pt	28.67	1.03	28.55	1.22	28.83	0.75	28.95	0.87	0.81	0.76	0.53
Iii-(A-Pg)	9.00	0.63	8.96	0.46	8.92	0.20	8.94	0.27	0.88	0.77	0.92
Isi-(A-Pg)	15.50	0.55	15.49	0.32	15.83	0.41	15.58	0.08	0.17	0.26	0.49
Isi-Isa/A-Pg	48.50	1.76	48.55	1.70	47.33	1.63	47.41	1.44	0.93	0.26	0.24
Iii-Iia/A-Pg	30.00	2.00	30.09	1.87	30.33	0.82	30.33	0.82	0.99	0.71	0.78
XI-Pocc	2.67	1.37	2.64	1.07	2.83	0.82	2.75	0.67	0.85	0.80	0.84
Li-(Pn-Pog)	8.17	0.41	8.18	0.33	8.10	0.47	8.19	0.43	0.74	0.80	0.97
Ans-St	27.17	1.17	27.14	1.24	27.33	0.52	27.52	0.30	0.46	0.76	0.48
St-Pocc	5.67	1.03	5.61	1.11	6.00	1.26	5.71	1.21	0.69	0.63	0.89
Po-Or/N-Pg	89.00	2.10	89.72	0.17	46.50	74.09	46.51	73.94	1.00	0.19	0.18
Ba-Na/Pt-GnI	-87.50	0.84	-87.67	1.23	-87.33	0.52	-87.32	0.57	0.97	0.69	0.55
Go-Me/Po-Or	23.83	0.98	23.78	0.89	23.67	0.52	23.80	0.77	0.73	0.72	0.96
N-Cf-A	54.83	1.33	54.88	1.39	56.33	1.75	56.14	1.75	0.85	0.13	0.20
Po-Or/N-A	98.17	0.75	98.25	0.79	98.00	0.63	97.86	0.51	0.68	0.69	0.34
Po-Or/Ans-Pns	2.58	1.02	2.60	1.18	2.67	0.88	2.71	0.68	0.93	0.88	0.84
Ba-N/Po-Or	23.00	1.10	22.95	0.97	22.92	0.92	22.87	0.76	0.92	0.89	0.87
Cc-N	50.00	1.10	50.07	1.02	50.33	1.03	50.41	0.98	0.89	0.60	0.57
Cd-XI/XI-Pm	-34.17	2.48	-34.33	2.58	-35.83	2.14	-35.58	2.03	0.84	0.24	0.37
XI-Pm	70.83	0.98	70.63	1.08	70.33	0.52	70.37	0.61	0.92	0.30	0.62
Po-Pt	43.50	2.74	43.47	2.70	41.83	1.33	41.82	1.40	0.98	0.21	0.21
GoI-Cf	61.33	1.63	61.22	1.62	61.83	1.17	61.76	0.98	0.91	0.56	0.50
Po-Or/Cf-XI	69.00	2.00	69.03	1.70	70.33	1.03	70.13	1.20	0.76	0.18	0.23
TIP	31.4	5.1	7.1	1.2	18.6	4.4	6.5	1.6	-	-	-
TC	31.9	5.9	-	-	23.2	2.8	-	-	-	-	-
TA	63.3	8.3	7.1	1.2	41.8	6.4	6.5	1.6	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 6 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-6	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.67	0.52	-2.73	0.59	-3.17	0.41	-3.37	0.15	0.28	0.09	0.13
Isi-Iii	2.67	0.82	2.63	0.63	2.75	0.42	2.63	0.36	0.60	0.83	0.93
Isi-Iii	1.27	0.50	1.13	0.34	1.03	0.08	1.26	0.24	0.06	0.29	0.48
Iii-Pocc	0.42	0.49	0.26	0.06	0.67	0.52	0.39	0.18	0.24	0.41	0.14
U3-L3	-1.17	1.33	-1.10	1.30	0.00	1.26	-0.03	1.38	0.97	0.15	0.20
Isi-Isa/Iii-Iia	111.67	1.97	111.88	1.78	112.17	0.98	111.96	0.81	0.70	0.59	0.92
A-(N-Pg)	3.33	0.82	3.56	0.77	3.00	0.63	3.08	0.51	0.81	0.45	0.23
Ans-XIPm	54.50	0.55	54.59	0.50	54.17	0.75	54.17	0.75	0.99	0.40	0.29
U6-Pt	13.50	0.84	13.58	0.96	13.17	0.75	13.05	0.67	0.78	0.48	0.29
Iii-(A-Pg)	8.67	0.82	8.50	0.59	8.83	0.41	8.76	0.33	0.73	0.66	0.38
Isi-(A-Pg)	11.17	0.41	11.22	0.42	11.33	0.52	11.47	0.38	0.62	0.55	0.31
Isi-Isa/A-Pg	33.00	1.90	32.85	1.79	32.00	0.89	32.19	0.66	0.68	0.27	0.42
Iii-Iia/A-Pg	35.33	1.63	35.27	1.58	36.00	0.89	35.85	0.68	0.75	0.40	0.43
XI-Pocc	2.50	0.84	2.74	0.77	3.00	0.63	3.18	0.58	0.63	0.27	0.30
Li-(Pn-Pog)	1.00	0.32	0.72	0.13	0.83	0.75	0.96	0.70	0.77	0.63	0.43
Ans-St	25.83	0.75	25.91	0.68	25.50	0.55	25.56	0.43	0.84	0.40	0.31
St-Pocc	10.50	0.55	10.42	0.35	10.83	0.41	11.03	0.51	0.47	0.26	0.17
Po-Or/N-Pg	80.00	0.63	80.02	0.57	80.83	0.41	80.66	0.27	0.42	0.02	0.13
Ba-Na/Pt-GnI	81.50	1.87	81.41	1.88	81.17	1.33	81.80	0.92	0.36	0.73	0.66
Go-Me/Po-Or	33.83	0.98	34.00	0.83	34.00	0.89	34.04	0.61	0.92	0.77	0.93
N-Cf-A	64.67	1.75	64.58	1.94	64.50	0.84	64.55	0.86	0.92	0.84	0.98
Po-Or/N-A	94.50	0.55	94.48	0.30	92.83	0.41	92.82	0.46	0.97	0.00	0.16
Po-Or/Ans-Pns	4.67	1.63	4.78	1.72	5.67	0.52	5.63	0.29	0.87	0.18	0.26
Ba-N/Po-Or	23.17	0.41	23.09	0.29	21.50	0.84	21.62	0.73	0.80	0.00	0.09
Cc-N	49.50	1.22	49.44	1.22	50.17	0.75	50.23	0.75	0.89	0.28	0.20
Cd-XI/XI-Pm	-36.67	2.34	-36.52	2.23	-35.50	1.38	-35.43	1.15	0.93	0.32	0.31
XI-Pm	64.33	0.82	64.38	0.53	63.83	0.75	63.91	0.80	0.88	0.30	0.25
Po-Pt	39.17	1.33	39.52	0.78	38.83	1.47	39.56	0.36	0.27	0.69	0.91
GoI-Cf	67.17	0.41	67.19	0.38	69.33	1.03	69.31	0.91	0.97	0.00	0.11
Po-Or/Cf-XI	61.00	1.26	61.29	1.15	61.17	1.33	61.27	1.29	0.89	0.83	0.98
TIP	33.0	5.4	7.4	1.3	19.6	4.6	6.9	1.6	-	-	-
TC	33.5	6.1	-	-	24.4	3.0	-	-	-	-	-
TA	66.5	8.7	7.4	1.3	43.9	6.8	6.9	1.6	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 7 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-7	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.50	0.55	-2.28	0.39	-2.33	0.52	-2.70	0.43	0.21	0.60	0.10
Isi-Iii	3.33	0.52	3.35	0.33	3.17	0.41	3.39	0.30	0.30	0.55	0.83
Isi-Iii	1.83	0.75	1.74	0.55	1.50	0.55	1.58	0.24	0.75	0.40	0.52
Iii-Pocc	1.33	0.82	1.28	0.55	1.00	0.63	0.92	0.52	0.81	0.45	0.26
U3-L3	0.83	0.75	0.92	0.60	1.17	0.98	1.27	1.06	0.87	0.52	0.49
Isi-Isa/Iii-Iia	104.67	2.34	104.65	2.32	104.83	1.47	104.67	1.42	0.85	0.89	0.92
A-(N-Pg)	8.00	0.63	7.94	0.52	7.67	0.52	7.57	0.57	0.77	0.34	0.27
Ans-XIPm	48.67	1.03	48.70	1.14	47.33	1.21	47.05	1.19	0.69	0.07	0.13
U6-Pt	22.50	0.55	22.59	0.58	22.17	1.17	22.41	0.24	0.63	0.54	0.49
Iii-(A-Pg)	8.83	0.41	8.66	0.30	8.75	0.42	8.81	0.40	0.80	0.73	0.47
Isi-(A-Pg)	11.83	0.41	11.84	0.20	12.17	0.41	12.06	0.31	0.63	0.19	0.18
Isi-Isa/A-Pg	40.33	2.07	40.27	2.06	38.50	1.05	38.46	1.07	0.95	0.08	0.09
Iii-Iia/A-Pg	34.83	0.75	35.08	0.68	36.83	1.72	36.87	1.81	0.97	0.03	0.07
XI-Pocc	1.50	1.38	1.45	1.26	1.00	0.63	1.11	0.40	0.74	0.44	0.54
Li-(Pn-Pog)	2.33	0.52	2.44	0.23	2.37	0.57	2.32	0.24	0.87	0.92	0.40
Ans-St	29.67	0.52	29.52	0.53	29.33	0.52	29.25	0.51	0.78	0.29	0.38
St-Pocc	5.50	1.38	5.63	1.27	6.50	0.55	6.50	0.53	0.99	0.13	0.15
Po-Or/N-Pg	85.50	0.55	85.67	0.48	85.67	0.52	85.60	0.35	0.81	0.60	0.78
Ba-Na/Pt-GnI	83.17	0.41	83.11	0.34	83.33	0.52	83.24	0.42	0.73	0.55	0.57
Go-Me/Po-Or	29.00	1.10	29.11	1.15	29.33	0.52	29.37	0.39	0.88	0.52	0.61
N-Cf-A	57.00	0.63	57.03	0.54	56.67	0.82	56.68	0.65	0.98	0.45	0.33
Po-Or/N-A	94.00	0.89	93.96	0.65	93.50	0.55	93.50	0.26	1.00	0.27	0.14
Po-Or/Ans-Pns	1.17	0.98	1.27	0.95	1.50	0.84	1.60	0.77	0.84	0.54	0.52
Ba-N/Po-Or	27.83	0.75	27.87	0.56	27.67	0.52	27.80	0.45	0.64	0.66	0.82
Cc-N	50.67	0.82	50.73	0.84	50.83	0.41	51.17	0.40	0.19	0.66	0.28
Cd-XI/XI-Pm	-27.33	2.73	-27.14	2.63	-29.17	1.94	-29.10	1.74	0.95	0.21	0.16
XI-Pm	63.00	1.10	63.08	1.15	62.33	0.82	62.77	0.32	0.25	0.26	0.55
Po-Pt	41.67	0.52	41.64	0.37	41.33	0.82	41.63	0.46	0.46	0.42	0.97
GoI-Cf	62.33	1.37	62.25	1.08	62.00	1.10	62.13	1.12	0.84	0.65	0.86
Po-Or/Cf-XI	73.17	0.75	73.24	0.66	73.00	0.63	72.95	0.59	0.89	0.69	0.44
TIP	34.6	5.6	7.8	1.3	20.5	4.8	7.2	1.7	-	-	-
TC	35.2	6.5	-	-	25.6	3.1	-	-	-	-	-
TA	69.8	9.2	7.8	1.3	46.1	7.1	7.2	1.7	-	-	-
Cdiag	88%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 8 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-8	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.33	0.52	-2.33	0.21	-2.50	0.55	-2.69	0.48	0.54	0.60	0.12
Isi-Iii	4.33	0.52	4.48	0.28	4.30	0.55	4.40	0.36	0.72	0.92	0.68
Isi-Iii	0.98	0.28	0.79	0.17	1.07	0.23	1.03	0.24	0.79	0.59	0.07
Iii-Pocc	0.50	0.55	0.57	0.17	0.17	0.41	0.42	0.45	0.32	0.26	0.47
U3-L3	0.67	0.82	0.67	0.55	-0.50	0.84	-0.39	0.75	0.82	0.03	0.12
Isi-Isa/Iii-Iia	106.33	2.42	106.16	2.52	104.33	1.63	104.34	1.50	1.00	0.12	0.16
A-(N-Pg)	4.50	0.55	4.70	0.43	4.08	0.20	4.12	0.36	0.83	0.11	0.13
Ans-XIPm	48.00	0.63	47.80	0.26	46.67	0.52	46.71	0.50	0.88	0.01	0.11
U6-Pt	17.17	1.60	17.31	1.59	19.50	0.55	19.64	0.62	0.69	0.01	0.17
Iii-(A-Pg)	6.67	0.52	6.52	0.32	7.17	0.41	7.03	0.36	0.56	0.09	0.13
Isi-(A-Pg)	10.83	0.41	11.07	0.33	11.50	0.84	11.53	0.67	0.95	0.11	0.16
Isi-Isa/A-Pg	40.83	1.47	40.82	1.42	41.67	1.21	41.88	1.19	0.76	0.31	0.19
Iii-Iia/A-Pg	33.17	1.60	33.01	1.49	33.67	0.52	33.78	0.48	0.70	0.48	0.26
XI-Pocc	2.33	0.82	2.24	0.58	2.83	3.31	3.14	3.36	0.88	0.73	0.53
Li-(Pn-Pog)	3.83	0.41	3.57	0.16	3.50	0.55	3.53	0.35	0.91	0.26	0.80
Ans-St	23.50	0.84	23.71	0.65	23.67	0.52	23.75	0.57	0.80	0.69	0.91
St-Pocc	9.00	0.63	9.03	0.49	9.83	0.98	9.68	1.10	0.80	0.11	0.22
Po-Or/N-Pg	85.50	0.84	85.54	0.89	86.50	0.55	86.33	0.40	0.55	0.03	0.17
Ba-Na/Pt-GnI	87.33	0.52	87.39	0.44	88.67	0.52	88.83	0.45	0.57	0.01	0.64
Go-Me/Po-Or	26.67	0.82	26.65	0.88	26.33	0.82	26.37	0.73	0.93	0.50	0.56
N-Cf-A	59.50	1.52	59.64	1.56	58.50	0.55	58.60	0.60	0.77	0.16	0.16
Po-Or/N-A	91.67	0.52	91.77	0.40	90.83	0.41	90.90	0.37	0.76	0.01	0.10
Po-Or/Ans-Pns	1.50	0.84	1.41	0.71	1.97	0.08	2.07	0.37	0.51	0.20	0.07
Ba-N/Po-Or	24.17	0.98	24.20	1.03	24.50	0.84	24.52	0.73	0.96	0.54	0.55
Cc-N	48.50	1.38	48.61	1.11	50.33	0.52	50.36	0.42	0.92	0.01	0.14
Cd-XI/XI-Pm	-29.00	1.26	-28.94	1.48	-30.00	0.89	-29.94	0.78	0.91	0.14	0.17
XI-Pm	63.50	0.55	63.61	0.59	62.83	0.75	62.79	0.68	0.92	0.11	0.08
Po-Pt	43.17	1.47	43.14	1.46	41.50	0.55	41.39	0.68	0.77	0.03	0.34
GoI-Cf	59.33	1.03	59.38	1.32	58.00	0.63	57.95	0.58	0.88	0.02	0.40
Po-Or/Cf-XI	66.17	1.60	66.09	1.82	69.33	0.82	69.14	0.60	0.65	0.20	0.50
TIP	36.4	5.9	8.2	1.4	21.6	5.1	7.6	1.8	-	-	-
TC	36.9	6.8	-	-	26.9	3.3	-	-	-	-	-
TA	73.3	9.6	8.2	1.4	48.4	7.5	7.6	1.8	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 9 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-9	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-2.33	0.52	-2.44	0.45	-3.00	1.26	-3.01	1.07	0.99	0.26	0.26
Isi-Iii	7.17	0.41	7.04	0.32	6.83	0.41	7.07	0.23	0.25	0.19	0.87
Isi-Iii	0.33	0.52	0.35	0.27	0.50	0.55	0.42	0.21	0.75	0.60	0.61
Iii-Pocc	0.50	0.55	0.48	0.25	0.33	0.52	0.45	0.33	0.65	0.60	0.87
U3-L3	2.00	3.90	2.03	3.87	4.83	3.25	4.81	3.08	0.99	0.20	0.20
Isi-Isa/Iii-Iia	115.00	1.26	114.92	1.16	114.83	1.17	114.83	1.05	1.00	0.82	0.89
A-(N-Pg)	5.00	0.63	4.97	0.53	5.33	0.82	5.36	0.75	0.95	0.45	0.31
Ans-XIPm	58.67	1.37	58.63	1.34	58.33	1.21	58.28	1.07	0.94	0.66	0.63
U6-Pt	20.83	1.17	20.83	1.27	21.50	0.55	21.62	0.50	0.70	0.23	0.19
Iii-(A-Pg)	5.50	0.55	5.41	0.40	5.33	0.52	5.30	0.52	0.90	0.60	0.69
Isi-(A-Pg)	12.33	0.52	12.30	0.46	12.17	0.41	12.20	0.31	0.88	0.55	0.66
Isi-Isa/A-Pg	37.17	1.33	37.27	1.32	37.67	1.21	37.73	1.32	0.93	0.51	0.55
Iii-Iia/A-Pg	27.67	0.82	27.81	0.84	27.50	0.84	27.43	0.75	0.89	0.73	0.43
XI-Pocc	8.83	1.17	8.81	1.09	8.33	0.82	8.31	0.77	0.96	0.41	0.38
Li-(Pn-Pog)	0.83	0.41	0.84	0.41	1.08	0.20	0.86	0.16	0.06	0.21	0.95
Ans-St	27.33	1.21	27.98	0.38	27.50	0.55	27.64	0.53	0.67	0.77	0.22
St-Pocc	9.00	1.26	9.01	1.01	10.00	1.26	9.86	1.11	0.84	0.20	0.20
Po-Or/N-Pg	85.33	0.82	85.21	0.80	86.00	0.63	85.98	0.66	0.95	0.14	0.10
Ba-Na/Pt-GnI	82.33	0.52	82.39	0.27	82.67	0.52	82.77	0.44	0.71	0.29	0.10
Go-Me/Po-Or	34.50	1.05	34.56	0.85	34.33	0.82	34.44	0.99	0.84	0.77	0.82
N-Cf-A	63.83	0.98	63.70	0.77	62.83	0.75	62.78	0.83	0.90	0.08	0.17
Po-Or/N-A	91.17	0.41	90.94	0.50	91.50	1.22	91.46	1.02	0.95	0.54	0.29
Po-Or/Ans-Pns	5.17	0.75	5.04	0.56	5.50	0.55	5.86	0.57	0.28	0.40	0.13
Ba-N/Po-Or	26.17	0.98	25.96	0.83	26.50	1.05	26.49	0.86	0.98	0.58	0.31
Cc-N	51.33	1.03	51.30	0.86	51.50	0.55	51.49	0.59	0.97	0.73	0.67
Cd-XI/XI-Pm	-26.00	0.89	-26.03	0.84	-26.83	1.17	-26.68	1.23	0.82	0.20	0.31
XI-Pm	64.00	0.63	64.00	0.59	63.17	0.75	63.18	0.86	0.98	0.06	0.28
Po-Pt	41.50	0.84	41.32	0.83	41.67	0.82	41.31	0.64	0.42	0.73	0.98
GoI-Cf	61.33	2.42	61.23	2.18	60.17	0.75	60.21	0.61	0.92	0.29	0.30
Po-Or/Cf-XI	70.67	1.21	70.72	1.25	72.33	0.82	72.31	0.97	0.97	0.02	0.17
TIP	38.2	6.2	8.6	1.5	22.7	5.3	8.0	1.9	-	-	-
TC	38.8	7.1	-	-	28.2	3.4	-	-	-	-	-
TA	77.0	10.1	8.6	1.5	50.8	7.8	8.0	1.9	-	-	-
Cdiag	96%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.

Resultados y métricas de evaluación para el caso 10 empleando el método de análisis cefalométrico de Ricketts.

CASO-10	NOVATOS				EXPERTOS					MT	MV
	Media MT	DE	Media MV	DE	Media MT	DE	Media MV	DE	*p2	*p3 (novato-experto)	*p4 (novato-experto)
U6-L6	-3.17	0.41	-3.29	0.31	-2.83	0.41	-3.15	0.24	0.13	0.19	0.40
Isi-Iii	4.33	0.52	4.52	0.22	4.17	0.41	4.30	0.15	0.49	0.55	0.79
Isi-Iii	3.67	0.52	3.68	0.28	3.92	0.20	3.68	0.28	0.12	0.30	0.83
Iii-Pocc	1.00	0.63	0.98	0.50	1.50	1.05	1.38	0.80	0.83	0.34	0.33
U3-L3	0.00	0.89	-0.02	0.74	1.00	0.63	0.93	0.53	0.84	0.05	0.39
Isi-Isa/Iii-Iia	116.00	1.67	116.07	1.61	115.33	1.51	115.43	1.72	0.92	0.48	0.52
A-(N-Pg)	2.50	1.05	2.29	1.04	2.17	0.75	2.07	0.61	0.81	0.54	0.66
Ans-XIPm	46.67	1.21	46.79	1.12	46.17	1.60	46.20	1.53	0.97	0.56	0.47
U6-Pt	22.83	0.75	22.70	0.66	23.00	0.63	23.03	0.47	0.93	0.69	0.35
Iii-(A-Pg)	6.50	0.55	6.53	0.70	6.33	0.82	6.54	0.40	0.60	0.69	0.98
Isi-(A-Pg)	11.33	0.52	11.19	0.47	11.00	0.63	10.96	0.42	0.89	0.34	0.39
Isi-Isa/A-Pg	35.33	2.16	35.34	1.80	35.00	1.10	35.02	0.98	0.97	0.74	0.71
Iii-Iia/A-Pg	28.50	1.05	28.59	1.40	29.50	1.38	29.54	1.52	0.96	0.19	0.28
XI-Pocc	6.17	1.94	6.10	1.96	6.50	1.38	6.22	1.32	0.72	0.74	0.91
Li-(Pn-Pog)	3.83	0.41	3.84	0.29	4.00	0.00	3.92	0.19	0.33	0.34	0.59
Ans-St	24.83	0.98	24.70	1.00	24.67	0.52	24.61	0.70	0.88	0.72	0.87
St-Pocc	10.33	1.21	10.38	1.16	11.00	1.26	11.03	1.18	0.97	0.37	0.36
Po-Or/N-Pg	88.17	0.75	88.17	0.59	88.83	0.41	88.74	0.24	0.64	0.09	0.56
Ba-Na/Pt-GnI	-87.83	0.98	-87.97	1.16	-87.25	1.08	-58.87	71.63	0.35	0.35	0.34
Go-Me/Po-Or	25.50	0.55	25.68	0.65	25.67	0.52	25.59	0.49	0.80	0.60	0.80
N-Cf-A	56.33	1.37	56.29	1.35	57.33	0.52	57.26	0.84	0.87	0.12	0.16
Po-Or/N-A	91.33	1.21	91.37	0.98	91.00	0.89	91.04	0.87	0.94	0.60	0.55
Po-Or/Ans-Pns	1.33	0.82	1.45	0.73	2.50	1.05	2.45	0.77	0.92	0.06	0.42
Ba-N/Po-Or	23.67	1.03	23.70	1.10	24.83	1.60	24.60	1.50	0.80	0.16	0.26
Cc-N	51.00	1.26	50.87	1.31	50.17	1.83	50.41	1.70	0.82	0.38	0.61
Cd-XI/XI-Pm	-37.17	0.75	-37.33	0.71	-36.83	1.60	-36.77	1.57	0.94	0.65	0.44
XI-Pm	63.83	0.75	63.93	0.66	63.50	0.84	63.65	0.81	0.76	0.48	0.52
Po-Pt	37.50	0.55	37.50	0.47	37.33	0.82	37.37	0.44	0.91	0.69	0.65
GoI-Cf	58.50	0.84	58.49	0.81	57.67	0.82	57.66	0.68	0.98	0.11	0.18
Po-Or/Cf-XI	73.50	0.55	73.43	0.71	74.33	0.52	74.09	0.61	0.48	0.02	0.12
TIP	40.1	6.5	9.0	1.6	23.8	5.6	8.4	2.0	-	-	-
TC	40.7	7.5	-	-	29.6	3.6	-	-	-	-	-
TA	80.8	10.6	9.0	1.6	53.4	8.2	8.4	2.0	-	-	-
Cdiag	100%	-	100%	-	100%	-	100%	-	-	-	-

M.T: Método tradicional; D.E: Desviación estándar; M.V: Método virtual empleando el módulo de cefalometría de OSSys; T.I.P: Tiempo de identificación de puntos anatómicos (min); T.C: Tiempo de cálculo de relaciones óseas (min); T.A: Tiempo total de análisis (min); C.Diag: Certeza en diagnóstico cefalométrico (%); \*significancia = 0.05.





## Apéndice 4. Resultados de diagnóstico cefalométrico

*Coincidencia del diagnóstico cefalométrico de McNamara de forma tradicional en contraste con el diagnóstico de referencia.*

		CASO DE ESTUDIO																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
Dr.1	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.2	PF	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.3	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.4	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.5	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.6	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.7	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.8	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	VA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Dr.9	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1
Dr.10	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1
Dr.11	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1
Dr.12	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1	VA	1
	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1

Dr. Doctor, PF: perfil facial, RM: relación molar, VA, vía aérea, TR: tratamiento recomenzado, 1:coincidencia con el diagnóstico de referencia, 0 sin coincidencia con el diagnóstico de referencia.

*Coincidencia del diagnóstico cefalométrico de McNamara de forma tradicional en contraste con el diagnóstico de referencia.*

		CASO DE ESTUDIO																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
Dr.1	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.2	PF	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.3	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.4	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.5	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.6	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.7	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.8	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.9	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.10	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Dr.11	PF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	TR	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
Dr.12	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1

Dr. Doctor, PF: perfil facial, RM: relación molar, TR: tratamiento recomenzado, 1:coincidencia con el diagnóstico de referencia, 0 sin coincidencia con el diagnóstico de referencia.

*Coincidencia del diagnóstico cefalométrico de McNamara de forma tradicional en contraste con el diagnóstico de referencia.*

CASO DE ESTUDIO																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Dr.1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	
Dr.2	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	0	
Dr.3	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.4	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.5	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	
Dr.6	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.7	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.8	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.9	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	
Dr.10	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	
	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	0	TR	1	TR	1	

	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
Dr.11	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1
	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1	PF	1
Dr.12	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1	RM	1
	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1	TR	1

Dr. Doctor, PF: perfil facial, RM: relación molar, TR: tratamiento recomenzado, 1:coincidencia con el diagnóstico de referencia, 0 sin coincidencia con el diagnóstico de referencia.



## Apéndice 5. Plan quirúrgico ortognático

<b>OSSys v2.0</b>					
<b>Thirds Analisis Results</b>					
<i>Facial length (mm)</i>	225.63				
<i>Upper facial third</i>	32.9%				
<i>Middle facial third</i>	29.8%				
<i>Bottom Facial third</i>	33.7%				
<i>Diagnosis</i>	<i>Second facial third diminished</i>				
<b>Fifth Analisis Results</b>					
<i>Facial width (mm)</i>	183.94				
<i>External right facial fifth</i>	20.2%				
<i>Central right facial fifth</i>	19.5%				
<i>Central fifth</i>	17.3%				
<i>Central left facial fifth</i>	19.6%				
<i>External left facial fifth</i>	20.4%				
<i>Diagnosis</i>	<i>Central fifth diminished</i>				
<b>Powell Analisis</b>					
<b>Measure</b>	<b>Patient</b>	<b>Standard</b>	<b>Diagnosis</b>		
<i>Naso-facial angle</i>	44.7	30-40	<i>Surgical treatment</i>		
<i>Nasal-maxilla angle</i>	133.4	120-132			
<i>Nasal-lip angle</i>	95	90-110			
<i>Cervical-jaw angle</i>	83.4	80-95			

*Resultados del plan quirurgico, análisis facial.*

## Ossys v2.0

### Ricketts Cephalometric Analysis Results

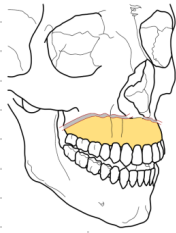
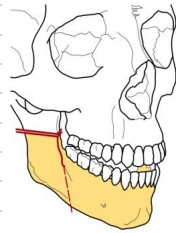
Measure	Measure Name	Patient	Unit	Standar	Unit	SD	Unit	Diagnosis
<u>Teething analysis</u>								
U6-L6	Molar relationship	-5.56	mm	-3	mm	3	mm	Class III patient
Isi-Isi	Overjet	1.969	mm	2.5	mm	2.5	mm	
Isi-Isi	Overbite	3.57	mm	2.5	mm	2.5	mm	Class III patient
Iii-Pocc	Inferius incisive to occlusal plane	0.429	mm	1.25	mm	2	mm	
U3-L3	Canine relationship	-0.52	mm	-2	mm	3	mm	
Isi-Isa/Iii-Iia	Intercisal angle	121.7	°	130	°	6	°	Proclinated incisive
<u>Skeletal analysis</u>								
A-(N-Pg)	Convexity	0.837	mm	0	mm	2	mm	
Ans-XIPm	Facial height	53.3	°	47	°	4	°	Increased midfacial angle, vertical pattern growth
<u>Dentoskeletal analysis</u>								
U6-Pt	Upper malar position	23.47	mm	23	mm	3	mm	
Iii-(A-Pg)	Inferius incisive protrusion	6.544	mm	1	mm	2.3	mm	Increased
Isi-(A-Pg)	Superius incisive protrusion	8.618	mm	3.5	mm	2.3	mm	Increased
Isi-Isa/A-Pg	Upper incisive angle	31.84	°	28	°	4	°	
Iii-Iia/A-Pg	Lower incisive angle	26.51	°	22	°	4	°	Class III patient
XI-Pocc	Occlusal plane to XI	5.12	mm	0	mm	5	mm	Short ramus mandible and dolicocephalic patient
<u>Esthetical analysis</u>								
Li-(Pn-Pog)	Labrale protrusion	1.407	mm	-2	mm	2	mm	Protruded inferius labrale
Ans-St	Labrale superius lenght	25.36	mm	24	mm	2	mm	
St-Pocc	Occlusal plane to labrale superius	6.181	mm	-2.5	mm	1	mm	Increased
<u>Craniofacial analysis</u>								
Po-Or/N-Pg	Facial depth	83.3	°	87	°	3	°	Retruded mandible
Ba-Na/Pt-Gnl	Facial axis	88.65	°	90	°	3.5	°	
Go-Me/Po-Or	Mandibular plane angle	30.14	°	26	°	4.5	°	
N-Cf-A	Maxillar height	65.03	°	53	°	3	°	Increased nasomaxillary growth
Po-Or/N-A	Maxillar depth	263.8	°	90	°	3	°	Retruded maxilla
Po-Or/Ans-Pns	Palatine plane angle	0.378	°	1	°	3.5	°	
<u>Inner structure analysis</u>								
Ba-N/Po-Or	Cranial deflection	22.37	°	27	°	3	°	Flat cranial base
Cc-N	Anterior cranial length	54.34	mm	55	mm	2.5	mm	
Cd-XI/XI-Pm	Mandible arc	-29.3	°	26	°	4	°	Down and backward menthon rotation
XI-Pm	Mandible body length	64.73	mm	65	mm	2.7	mm	
Po-Pt	Porion position	40.42	mm	76	mm	2.2	mm	Skeletall class III
GoI-Cf	Posterior facial height	61.88	mm	76	mm	3.3	mm	Diminished mandible ramus growth, dolicocephalic patient
Po-Or/Cf-XI	Mandible ramus position	72.45	°	76	°	3	°	Class III malocclusion

*Resultados del plan quirurgico, cefalometría.*



# OSSys v2.0

## Surgery Planning

LeFort I									
	Maxilla Setfront (+)	10.39	mm						
	Maxilla Setback	0.00	mm						
	Maxilla Set-right (+)	0.00	mm						
	Maxilla Set-left (-)	0.00	mm						
	Maxilla proclinated	0.00	deg						
	Mxilla retroclinated	0.00	deg						
BSSO									
	Mandible Setfront (+)	3.12	mm						
	Mandible Setback	0.00	mm						
	Mandible Set-right (+)	0.00	mm						
	Mandible Set-left (-)	0.00	mm						
	Mandible proclinated	0.00	deg						
	Mandible retroclinate	0.00	deg						

Resultados del plan quirurgico, reposicionamiento maxilar.