



ARTÍCULO ORIGINAL

Mejora de la planificación de las cirugías endoscópicas nasosinusales a partir de imágenes en 3 dimensiones con Osirix® y estereolitografía



Serafín Sánchez-Gómez^{a,*}, Tomás F. Herrero-Salado^a, Juan M. Maza-Solano^a,
Francisco Ropero-Romero^a, Jaime González-García^a y Jesús Ambrosiani-Fernández^b

^a Unidad de Gestión Clínica de Otorrinolaringología, Hospital Universitario Virgen Macarena, Sevilla, España

^b Departamento de Anatomía y Embriología Humana, Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Recibido el 22 de junio de 2014; aceptado el 20 de octubre de 2014

Disponible en Internet el 15 de enero de 2015

PALABRAS CLAVE

Realidad virtual;
Imágenes en 3
dimensiones;
Estereolitografía;
Planificación
quirúrgica

Resumen

Introducción y objetivos: La elevada variabilidad anatómica de los senos paranasales requiere disponer del mejor conocimiento de su conformación tridimensional para afrontar la cirugía con mayor seguridad y eficiencia. El objetivo del estudio fue validar la utilidad de Osirix® y la estereolitografía en la mejora de la planificación de las cirugías endoscópicas nasosinusales.

Métodos: Se utilizó Osirix® como visor y gestor de imágenes DICOM en 3 dimensiones (3D) en la planificación de 114 cirugías endoscópicas nasosinusales por poliposis (86) y rinosinusitis crónica (28) junto con prototipos rápidos estereolitográficos en 7 mucocelos frontoetmoidales.

Resultados: Se identificaron mayor número de estructuras anatómicas, más rápidamente y con una correlación clínico-radiológica estadísticamente significativa ($p < 0,01$) a favor de Osirix y estereolitografía, que con placas en 2D de la TAC. Con una participación de los residentes superior al 75% de la cirugía, se redujo el tiempo quirúrgico en $38 \pm 12,3$ min en sinusitis crónicas y en $42 \pm 27,9$ en poliposis nasosinusales, alcanzando los residentes de cuarto año una competencia quirúrgica del 100% en los hitos quirúrgicos cruciales con 16 cirugías (IC: 12-19).

Conclusiones: La utilización sistemática de Osirix® para visualización y tratamiento autónomo de imágenes nasosinusales en 3D desde archivos DICOM permite a los cirujanos efectuar las cirugías endoscópicas nasosinusales con mayor confianza y seguridad y en menos tiempo que utilizando imágenes en 2D. Los residentes también alcanzan la competencia quirúrgica más rápidamente, con mayor seguridad y con menos complicaciones. La mejora en la planificación se incrementa cuando el equipo quirúrgico dispone de prototipos rápidos estereolitográficos en los casos de mayor complejidad.

© 2014 Elsevier España, S.L.U. y Sociedad Española de Otorrinolaringología y Patología Cérvico-Facial. Todos los derechos reservados.

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: sanchezsg@us.es (S. Sánchez-Gómez).

KEYWORDS

Virtual reality;
Three-dimensional
imaging;
Stereolithography;
Surgical planning

Improved planning of endoscopic sinonasal surgery from 3-dimensional images with Osirix® and stereolithography

Abstract

Introduction and objectives: The high variability of sinonasal anatomy requires the best knowledge of its three-dimensional (3D) conformation to perform surgery more safely and efficiently. The aim of the study was to validate the utility of Osirix® and stereolithography in improving endoscopic sinonasal surgery planning.

Methods: Osirix® was used as a viewer and Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) 3D imaging manager to improve planning for 114 sinonasal endoscopic operations with polyposis (86) and chronic rhinosinusitis (CRS) (28). Stereolithography rapid prototyping was used for 7 frontoethmoidal mucoceles.

Results: Using Osirix® and stereolithography, a greater number of anatomical structures were identified and this was done faster, with a statistically-significant clinical-radiological correlation ($P < .01$) compared with 2D CT plates. With a share of more than 75% of surgery performed by residents, surgical time was reduced by 38 ± 12.3 min in CRS and 42 ± 27.9 in sinonasal polyposis. The fourth-year residents reached 100% surgical competence in critical surgical milestones with 16 surgeries (CI 12-19).

Conclusions: The systematic use of Osirix® for visualisation and treatment of 3D sinonasal images from DICOM data files, along with the surgical team's ability to manipulate them as virtual reality, allows surgeons to perform endoscopic sinonasal surgery with greater confidence and in less time than using 2D images. Residents also achieve surgical competence faster, more safely and with fewer complications. This beneficial impact is increased when the surgical team has stereolithography rapid prototyping in more complex cases.

© 2014 Elsevier España, S.L.U. y Sociedad Española de Otorrinolaringología y Patología Cérvico-Facial. All rights reserved.

Introducción

La planificación de la ejecución de las cirugías endoscópicas nasosinusales requiere conocer con antelación a la intervención la conformación y disposición de las estructuras nasosinusales con la mayor precisión posible. Su objetivo es tratar completamente la enfermedad, evitar complicaciones y no dar lugar a cirugías fallidas¹. La elevada variabilidad interindividual de la anatomía nasosinusal es objeto de múltiples publicaciones que pretenden precisar la propia anatomía y su nomenclatura, así como la identificación de las estructuras a través de las imágenes radiológicas². La configuración tridimensional de los elementos anatómicos obliga a que los cirujanos efectúen un complejo proceso psicológico y neurológico³ para interpretar las imágenes en 2 dimensiones (2D) procedentes de estudios mediante tomografía axial computarizada (TAC) o resonancia magnética nuclear (RMN). Deben elaborar una recreación especulativa de la anatomía nasosinusal normal y de la anatomía alterada por la lesión a operar, así como de su relación con las restantes estructuras anatómicas y entre sí. Recientes y muy difundidos textos pretenden ayudar a los cirujanos en la tarea de planificar la cirugía endoscópica nasosinusal a partir de fórmulas imaginativas que les faciliten la interpretación en 3 dimensiones (3D) de las imágenes radiológicas en 2D⁴.

Los servicios de diagnóstico por la imagen intentan facilitar este proceso mental aportando imágenes en 2D en planos del espacio convencionalmente estandarizados. La

evolución tecnológica está sustituyendo la selección de imágenes del radiólogo por sistemas en red hospitalarios que permiten a los clínicos acceder desde visores específicos o desde ordenadores ubicados en consultas o quirófanos al archivo completo de las imágenes *digital imaging and communication in medicine* (DICOM) con la extensión .dcm. No obstante, la información orientada a la cirugía sigue siendo insuficiente⁵. Los navegadores quirúrgicos intraoperatorios (cirugía asistida por ordenador) efectúan reconstrucciones tridimensionales de las imágenes DICOM. Aportan una visión multiplanar simultánea en 2D combinada con la imagen endoscópica⁶, pero obligan a realizar estas tareas dentro del quirófano.

En abril de 2004 apareció Osirix® (Pixmeo, Suiza), un programa de código abierto desarrollado por Rosset, Spadola y Ratib que transforma un ordenador Apple Macintosh® en una estación de trabajo DICOM para procesar y visualizar imágenes médicas de múltiples fuentes (RMN, TAC, PET, PET-TAC, SPECT-TAC, ultrasonidos, etc.)^{7,8}. El programa se distribuye bajo una licencia tipo GNU, y su código está disponible en forma abierta, gratuita y libre⁹. Osirix ofrece una elevada fiabilidad, admitiendo un error máximo de precisión de 0,3 mm¹⁰. El cirujano puede visualizar de forma dinámica y simultánea todos los cortes desplazando el punto de cruce de los ejes a cualquier posición. Puede efectuar mediciones lineales, de áreas y volumétricas y realizar las reconstrucciones tridimensionales que crea más convenientes. Todo ello de forma autónoma, incluso fuera del quirófano, en consultas o salas de reuniones y aulas,

grabando selecciones del trabajo en imágenes o vídeos. Se evita así la pérdida de información que se genera en el proceso de impresión radiológica o visión por cortes estáticos.

Un método idóneo de obtener una percepción tridimensional de las estructuras se basa en la disposición de modelos artificiales que simulen al máximo posible el modelo real, que cumplen una función semejante a la de las maquetas en el ámbito de la construcción¹¹. En esta línea, la estereolitografía se ha venido utilizando en los últimos 20 años como una tecnología de ayuda en el entrenamiento y planificación quirúrgica con la elaboración de modelos tangibles tridimensionales muy precisos mediante impresoras 3D a partir de las imágenes DICOM de las TAC^{12,13}.

El objetivo del presente trabajo ha sido el de validar la utilidad del software libre Osirix® y la estereolitografía como herramientas tecnológicas de manejo de imágenes en 3D y de prototipos rápidos procedentes de archivos DICOM a través de la ayuda que proporcionan a los otorrinolaringólogos en la planificación de las cirugías endoscópicas nasosinusales de manera personalizada para cada paciente, así como la mejora que proporcionan a los residentes en el aprendizaje de la anatomía nasosinusal y su correspondiente competencia quirúrgica.

Material y métodos

Material

Se evaluó el proceso de planificación quirúrgica con Osirix® y estereolitografía en 114 intervenciones de cirugía endoscópica nasosinusal consecutivas desde febrero de 2012 hasta mayo de 2014 con los diagnósticos de poliposis nasosinusal (n=86) y rinosinusitis crónica (RSC) (n=28) y una puntuación de sus imágenes de TAC menor de 16 puntos en la escala Lund-Mackay, con afectación del complejo osteomeatal pero en las que no estaba indicada la utilización obligada del navegador según las recomendaciones de la Academia Americana de Otorrinolaringología y Cirugía de Cabeza y Cuello¹⁴. Fueron seleccionados para la realización de prototipos rápidos estereolitográficos 7 casos adicionales que presentaban mucocelos frontoetmoidales y que precisaban la utilización de navegador intraoperatorio por aplicación de estas mismas recomendaciones dada la existencia de incertidumbre sobre los límites de las lesiones, la afectación o no de tejidos y estructuras sanas, y los posibles planos de clivaje.

Los participantes fueron 4 especialistas en ORL del propio servicio con dedicación específica a rinología, 2 MIR-3 y 5 MIR-4 de ORL.

Proceso de planificación quirúrgica

El proceso de planificación quirúrgica se basó en 2 actividades: 1) navegación prequirúrgica por realidad virtual con Osirix® previa a la intervención; 2) impresión de un prototipo rápido estereolitográfico en 3D en los 7 casos nasosinusales complejos.

Navegación prequirúrgica virtual con Osirix®

Todos los casos se evaluaron por los ORL y MIR participantes en una sesión imagenológica específica de 30 min de duración previa a la cirugía, cumplimentando la lista de verificación de imágenes radiológicas¹⁵.

Estereolitografía

Nuestro grupo ha utilizado modelos estereolitográficos para entrenamiento con cabezas humanas criopreservadas y para planificación quirúrgica desde febrero de 2012. El proceso de prototipado rápido estereolitográfico consta de 4 fases:

Fase 1. Se seleccionan imágenes DICOM (.dcm) en la TAC del paciente.

Fase 2. Se genera un modelo digital 3D con Osirix®.

Fase 3. Se obtiene un modelo digital de uno o más sólidos independientes con todas sus caras cerradas correctamente, algo que no puede hacerse con Osirix®, por lo que se requiere un programa informático que lo consiga. Nosotros utilizamos Rhinoceros®, un modelador *non uniform rational b-splines* (NURBS) que emplea un modelo matemático para generar y representar curvas y superficies para prepararlo para su impresión. Se obtiene un archivo con la extensión .stl (de estereolitografía) que crea una malla de matriz triangular cuyo objetivo es ser explícitamente artificial para diferenciar claramente entre los distintos niveles de representación del modelo real y su limitación por motivos técnicos y clínicos. El programa traslada los algoritmos complejos a matrices cartesianas de puntos interpretables por las impresoras 3D que trabajan con un modelo único basado en uno o varios sólidos independientes, y permiten hacerlo con distintas capas. El modelo construido digitalmente con Rhinoceros® sigue los siguientes pasos: 1) evaluación del modelo; 2) eliminación de zonas innecesarias; 3) generación de mallas auxiliares horizontales superior e inferior; 4) generación de mallas auxiliares dorsales; 5) unión de mallas auxiliares al modelo principal; 6) análisis de la malla resultante; 7) búsqueda y reparación de bordes y ejes abiertos; 8) exportación del modelo a imprimir.

Fase 4. Se realiza la impresión 3D a partir de los archivos .stl generados con Rhinoceros®. Nosotros utilizamos 2 impresoras 3D: 1) ProJet SD 3000® (3D Systems, Rock Hill, SC, EE. UU.), impresora para diseño industrial que utiliza resina líquida fotosensible; 2) MakerBot Replicator®, impresora de uso doméstico que usa filamento fundido de plástico ABS. El alto precio de la primera se encuentra en consonancia con la alta calidad de los prototipos que produce, al fotopolimerizar un monómero líquido de resina epoxi (Accura 60 SLA®, 3D Systems, Rock Hill, SC, EE. UU.) por la acción de una radiación ultravioleta emitida por un láser móvil («fraguado») al que se le añaden fotoinhibidores. La profundidad del fraguado tiene lugar en función de la profundidad de la penetración óptica de la resina y de la velocidad y potencia del rayo de láser móvil, que determina el grosor de cada lámina. La resolución de cada plano se determina principalmente por el limitado tamaño del rayo láser y por la precisión de la mecánica de desplazamiento del láser. Posteriormente, la superficie se cubre con una

nueva capa de monómero líquido sobre la que el rayo láser inscribe de nuevo un patrón. Cuando se acaba de construir el prototipo lámina a lámina se elimina el exceso de resina enjuagándolo con un disolvente como el monometileter tripropileno glicol, seguido por otro enjuague con alcohol o agua. Los prototipos rápidos obtenidos con plástico ABS tienen menos calidad con relación a la textura y consistencia y a su semejanza con los modelos reales.

Los prototipos rápidos estereolitográficos fueron estudiados previamente a la cirugía en las correspondientes sesiones imagenológicas. Posteriormente se esterilizaron y se llevaron a quirófano para complementar el arsenal imagenológico durante la intervención.

Procedimiento de validación de la planificación quirúrgica

La evaluación de las posibles mejoras que aportaba la planificación quirúrgica basada en imágenes en 3D con Osirix® y estereolitografía se midió a través de las variables de correlación clínico-radiológica, reducción del tiempo quirúrgico, confianza y seguridad de los cirujanos durante la cirugía y competencia de los residentes en la ejecución de los procedimientos.

La correlación clínico-radiológica se evaluó comparando las identificaciones efectuadas según el listado de verificación radiológica¹⁵ en las placas 2D convencionales con las identificaciones prequirúrgicas con Osirix® y los hallazgos endoscópicos e imágenes con navegador (DigiPointeur®, CollinMedical) de forma intraoperatoria. Para ello se utilizó la prueba *U* de Mann-Whitney, asumiendo una significación estadística de $p < 0,05$.

La reducción del tiempo quirúrgico se midió mediante la comparación con cirugías similares en tipo y complejidad previas al período de estudio a través de la base de datos quirúrgica del hospital (MEDIX 3) efectuadas por los mismos cirujanos y con una proporción de ejecución por los residentes también similar: superior al 75% de la intervención.

Para evaluar la confianza y seguridad durante la cirugía, cada cirujano evaluó aleatoriamente una muestra de 9 casos de cada grupo (RSC, poliposis). Los cirujanos debían identificar las estructuras anatómicas cruciales para la orientación clínico-quirúrgica¹⁵: celdas del agger nasi, celdas frontoetmoidales, receso frontal, apófisis unciforme, cornete medio, arterias etmoidales anterior y posterior, grado de Keros, ampolla etmoidal, celdas y recesos periampolares, celdas etmoidales posteriores, seno esfenoidal, nervio óptico, nervio vidiano, segunda rama del nervio trigémino, fosa pterigopalatina, conducto palatino mayor, arteria carótida interna. Se les presentaron inicialmente las imágenes originales en 2D impresas en placas radiológicas (visualización estándar). Posteriormente las visualizaron y manipularon libremente con Osirix® (visualización virtual + tratamiento de las imágenes). Se midió el tiempo empleado y el porcentaje de estructuras identificadas correctamente en cada una de las 2 opciones. Finalmente cumplieron el National Aeronautics and Space Administration Task Load Index (NASA-TLX, índice NASA para la carga de trabajo) para medir la carga de trabajo que había requerido cada caso¹⁶. El cuestionario estándar incluye 6 subescalas para

esfuerzo, frustración, demandas mental, física y temporal, y desempeño, en una escala analógica visual de 0 a 20. En nuestro estudio, la demanda física fue excluida porque no se debía completar ninguna tarea física. Se desagregó la evaluación de los 7 casos nasosinuales sobre los que se obtuvieron prototipos rápidos estereolitográficos. Las puntuaciones se analizaron mediante el test de Wilcoxon, después de confirmar el supuesto de normalidad de los datos utilizando un gráfico de cuantiles, con una significación estadística con una $p < 0,05$.

Se verificó la competencia de los residentes en cirugía endoscópica nasosinusal mediante la herramienta propuesta por Lin¹⁷ (tabla 1), consistente en una lista de verificación que valora el logro del residente en las tareas específicas de la cirugía en una escala de 1 a 5, agrupándolas en 3 elementos críticos (hito 1: uncinectomía, antrostomía maxilar y etmoidectomía anterior; hito 2: etmoidectomía posterior y esfenoidectomía; hito 3: sinusotomía frontal), más una parte global que evalúa el desempeño en tareas más genéricas. Con una puntuación de 3 sobre 5 en cada ítem se considera al residente competente en la realización de cirugía endoscópica nasosinusal (60%), aplicando los niveles de competencia propuestos por Laeck¹⁸ y teniendo en cuenta que el residente haya ejecutado con supervisión más del 75% del procedimiento. La validación del progreso se efectuó por los tutores de los 7 residentes evaluados durante los años 2012, 2013 y 2014 a través de la aplicación FORMIR de la Sociedad Española de Otorrinolaringología y Patología Cérvico-Facial.

Resultados

La correlación clínico-radiológica obtenida con la endoscopia y el navegador intraoperatorios fue estadísticamente significativa a favor de Osirix® ($p < 0,01$) en todas las estructuras evaluadas ($> 95\%$; IC: 95-98) en comparación con la utilización de imágenes 2D impresas en placas, donde se había alcanzado una correlación del 57% en la identificación precisa de las celdas frontoetmoidales (IC: 46-72), del 62% en las celdas del agger nasi (IC: 47-65), del 67% en la inserción/inserciones superiores de la apófisis unciforme (IC: 52-77), del 68% en las celdas y recesos periampolares (IC: 56-78), del 73% en la inserción superior/lateral del cornete medio (IC: 64-81) y superior al 90% en las demás estructuras.

Con la utilización de Osirix® se redujo el tiempo quirúrgico en una media de 38 min (DE: 12,3) en RSC y en 42 min (DE: 27,9) en poliposis nasosinuales.

El test de Wilcoxon para muestras pareadas mostró unos resultados estadísticamente significativos para todas las subescalas en el NASA-TLX con un valor de la $p < 0,007$ en todas las comparaciones de imágenes tridimensionales que enfrentaban Osirix® y los prototipos rápidos estereolitográficos con las imágenes en 2D de las placas impresas por el Servicio de Radiodiagnóstico (fig. 1).

La figura 2 muestra la secuencia del proceso de planificación quirúrgica. La tabla 2 recoge las puntuaciones alcanzadas por los residentes en cada uno de los hitos de Lin¹⁷; muestra, asimismo el desarrollo de su curva de aprendizaje para alcanzar cada uno de los niveles de competencia.

Discusión

La visualización y tratamiento de imágenes DICOM adquiere con Osirix® una dimensión especialmente relevante para la

Tabla 1 Listado de verificación de las tareas específicas de cirugía endoscópica nasosinusal (Lin³⁰)

Nombre del residente:					Año de MIR:	
Evaluador:					Fecha:	
	Incapaz de realizarla	Capaz de realizar la mayoría de las tareas			La realiza con facilidad y soltura	No disponible
1) Endoscopia						
a. Paso inferior	1	2	3	4	5	
b. Paso intermedio	1	2	3	4	5	
c. Paso superior	1	2	3	4	5	
2) Preparación intranasal						
Colocación de lentinas con vasoconstrictor	1	2	3	4	5	
Infiltración de la pared lateral nasal	1	2	3	4	5	
Infiltración esfenopalatina por el agujero palatino mayor cuando está indicada	1	2	3	4	5	
3) Uncinectomía						
Identificación de la apófisis unciforme y sus límites	1	2	3	4	5	
Incisión retrógrada o con bisturí falciforme	1	2	3	4	5	
Extirpación con fórceps o debridador	1	2	3	4	5	
4) Antrostomía maxilar						
Identificación del ostium natural del seno maxilar	1	2	3	4	5	
Ampliación del ostium a expensas de la fontanela posterior cuando está indicada	1	2	3	4	5	
5) Etmoidectomía anterior						
Identificación de la ampolla	1	2	3	4	5	
Extirpación de la ampolla con fórceps o debridador preservando la mucosa	1	2	3	4	5	
Extirpación de las celdas etmoidales anteriores con identificación de los límites (cornete medio, lamela basal, cornete superior)	1	2	3	4	5	
6) Etmoidectomía posterior						
Penetración inferior por la lamela basal preservando su porción horizontal	1	2	3	4	5	
Extirpación de celdas etmoidales posteriores, identificando la base del cráneo y el cornete superior	1	2	3	4	5	
7) Esfenoidostomía						
Acceso al seno esfenoidal a través del etmoides posterior en el triángulo inferomedial o a través de su ostium natural	1	2	3	4	5	
Ampliación de los ostia esfenoidales	1	2	3	4	5	
Identificación de la localización de la carótida interna y del nervio óptico	1	2	3	4	5	
8) Sinusotomía frontal						
Extirpación atraumática de tabiques óseos en el receso frontal	1	2	3	4	5	
Identificación de la base del cráneo y de la pared orbitaria	1	2	3	4	5	

planificación quirúrgica y para el aprendizaje de los especialistas de ORL en formación. Solo está disponible actualmente para plataformas Apple Macintosh®, pero supera las prestaciones de otros visores diseñados para entornos Windows® por su sencillez para visualizar y manipular imágenes en

forma multimodal y multidimensional (bidimensionales, tridimensionales, series tridimensionales 3D con dimensión temporal, reconstrucción multiplanar, simulación de superficie, simulación de volumen y simulación endoscópica), especialmente en la función *region of interest* (ROI)¹⁹. La

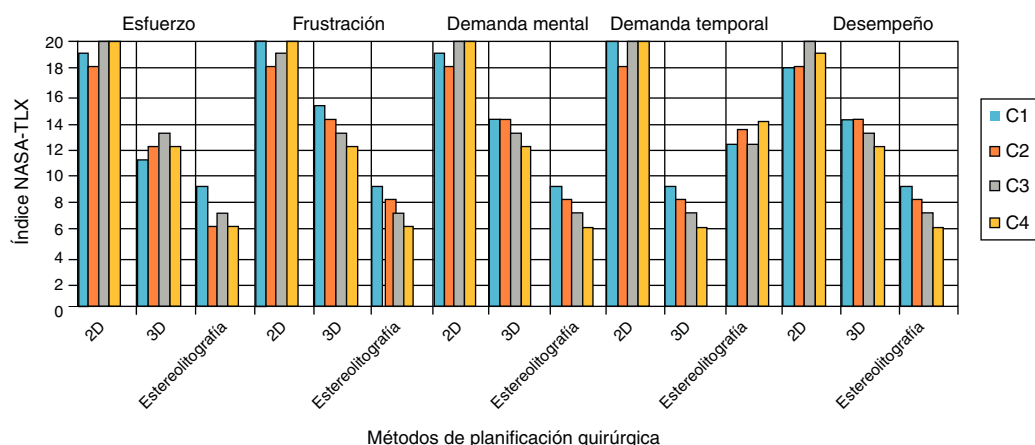


Figura 1 Carga de trabajo para elaborar una imagen tridimensional e identificar las estructuras de interés quirúrgico aplicando el índice NASA-TLX. (C1- C4: cirujanos).

transformación y manipulación de imágenes con Osirix® con criterios de realidad virtual a demanda del cirujano puede llevarse a cabo en entornos fuera del Servicio de Radiodiagnóstico y de los quirófanos. Se incrementa de esta manera la autonomía del equipo quirúrgico y potencia su percepción de seguridad durante la cirugía²⁰. Osirix® se puede convertir así en una herramienta inestimable de ayuda al cirujano en centros que no dispongan de navegador quirúrgico o de estaciones radiológicas con visores multiplanares²¹.

Existen distintos factores que influyen en la duración de una cirugía endoscópica nasosinusal²². Pero la memorización por los cirujanos o la posibilidad de consultar intraoperatoriamente las imágenes tratadas con Osirix® pueden reducir por sí solas el tiempo quirúrgico por su precisión y elevada correlación clínico-radiológica y por la visualización de la conformación completa de las estructuras anatómicas. Se evitan las maniobras de tanteo durante la cirugía y se confiere seguridad al cirujano². Estos últimos aspectos son relevantes cuando la cirugía se lleva a cabo en más del 75% de su ejecución por especialistas en formación con distinto grado de competencia y que prolongan la duración de la intervención. La variabilidad en el grado de competencia de los residentes y el elevado porcentaje de ejecución de las cirugías evaluadas (de igual manera que ocurría con las comparadas en el período anterior) permiten considerar que la reducción del tiempo quirúrgico tuvo lugar fundamentalmente por la mejora aportada por

Osirix® y la estereolitografía para la planificación de las operaciones. El tiempo y el esfuerzo invertidos en la evaluación preoperatoria de las imágenes DICOM con Osirix® son menores a los empleados en analizar las placas o imágenes en 2D y obtienen mejores resultados. Se evidencia cómo incluso especialistas ORL expertos en elaborar reconstrucciones mentales tridimensionales a partir de placas 2D se benefician significativamente de herramientas tecnológicas que facilitan este proceso como Osirix®, sobre todo con la disposición de modelos tangibles como los prototipos rápidos estereolitográficos, según se pudo comprobar con los resultados del NASA-TLX (fig. 1). No obstante, al haber reservado la estereolitografía para casos especialmente complejos, el beneficio percibido en estas ocasiones es posible que no pueda extrapolarse a casos menos complejos.

Desde su prometedora inclusión en el arsenal médico-quirúrgico, la estereolitografía no se ha extendido en otorrinolaringología con la intensidad y rapidez pronosticadas en sus inicios. Se han publicado muy escasas experiencias en la utilización de modelos estereolitográficos en nuestra especialidad²³⁻²⁹. Es posible que los elevados costes del procedimiento, la lentitud de la fabricación de los modelos y la baja calidad de la resolución de las estructuras impresas hayan sido responsables de esta situación en otorrinolaringología. Esto no ha ocurrido en otras especialidades como la cirugía cráneo-maxilo-facial^{30,31} y la odontología¹², donde su aplicación se ha dirigido hacia la planificación y

Tabla 2 Consecución de la competencia quirúrgica con la utilización de Osirix® y estereolitografía por los residentes de ORL

Puntuaciones con las que alcanzan un 60% de competencia en cada hito				N.º de pacientes con los que alcanza la competencia en cada nivel		
Año de MIR	Hito 1 (máx. 40)	Hito 2 (máx. 25)	Hito 3 (máx. 10)	60%	80%	100%
R3	35		3	7	9	-
R3	36	18	4	6	9	-
R4	40	25	8	6	10	15
R4	40	25	7	8	12	17
R4	40	25	6	7	11	19
R4	40	25	6	7	10	18
R4	40	25	9	5	8	12

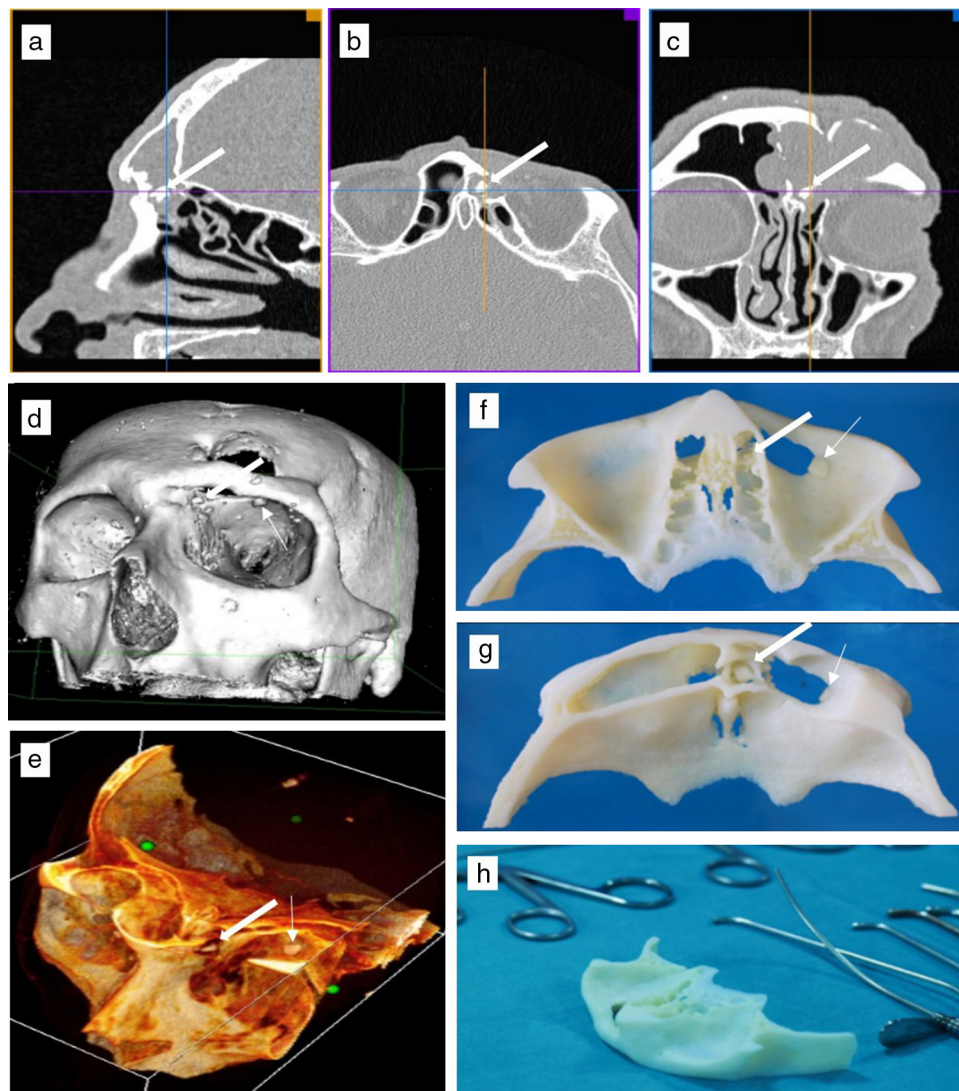


Figura 2 Caso de mucocoe frontal izquierdo postraumático por obliteración del receso frontal con un fragmento óseo y desaparición de elementos óseos de la tabla externa del frontal y del techo de la órbita izquierdos. a-c) identificación del punto de interés por el cruce de los ejes, que puede verse simultáneamente en los planos sagital, axial y coronal de Osirix y desplazarse a voluntad; d) reconstrucción de superficie con Osirix®; e) reconstrucción volumétrica con Osirix® y tratamiento de las imágenes en 3D según el interés de las áreas a visualizar; f) prototipo rápido estereolitográfico de volúmenes seleccionados a partir de imágenes DICOM desde una visión inferior; g) prototipo rápido estereolitográfico de volúmenes seleccionados a partir de imágenes DICOM desde una visión superior; h) utilización en quirófano de los prototipos rápidos estereolitográficos esterilizados para completar el arsenal imagenológico. Flecha gruesa: fragmento óseo frontoetmoidal; flecha fina: fragmento óseo orbitario.

ejecución de reconstrucciones y modelamientos óseos con materiales sintéticos y autógenos idénticos a los defectos a reparar o el reposicionamiento exacto de los materiales de autotrasplante. Continuamente están apareciendo nuevos dispositivos de impresión en 3D, pero los que ofrecen mayor calidad de impresión aún alcanzan costes elevados y requieren largos tiempos de impresión (incluso más de 8 h se puede llegar a tardar en imprimir un corte axial completo de la cabeza de 3 cm de altura en escala real). Las mejores impresoras deben amortizar un coste de adquisición superior a 50.000 €, mientras que las que ofrecen otros niveles de calidad menor a estas, como las nuestras, se pueden adquirir en torno a los 2.500 €. El coste de las resinas y plásticos oscila entre 45 y 125 € por cada kit de impresión.

No obstante, el mayor coste se centra en el del personal que debe tratar las imágenes DICOM para su transformación en archivos .stl. Estas circunstancias han hecho que la impresión en 3D de prototipos rápidos se limitara en nuestro caso a los pacientes que presentaban una mayor complejidad anatómica. Los prototipos rápidos en 3D que imprime nuestro grupo consiguen unos acabados de apariencia y textura ósea mucho más aceptables y realistas que los obtenidos por los pioneros de esta tecnología en otorrinolaringología. Han podido beneficiarse también de una de las ventajas de la estereolitografía como es la posibilidad de modificar las escalas de impresión.

Expertos del modelo americano de formación especializada en otorrinolaringología indican que los residentes

deberían tener una experiencia de 30 disecciones de cabezas de cadáveres antes de realizar la cirugía endoscópica nasosinusal en quirófano en pacientes vivos³². La realidad de la mayoría de los países es incompatible con esta opinión, por lo que la transferencia de habilidades desde los simuladores de realidad virtual y de un número pequeño de disección de cadáveres en cursos plantea el desarrollo de una curva de aprendizaje sobre pacientes reales³³. Esta metodología conduce al registro de una incidencia del 15,9% de complicaciones menores entre los residentes que efectúan cirugía endoscópica nasosinusal sobre pacientes, significativamente mayor que la de los especialistas titulados (8%)³⁴. Laeeq¹⁸ demostró, utilizando el método de evaluación de Lin¹⁷ en residentes desde 2.º a 5.º año de MIR, que la competencia se alcanzaba para el hito 1 después de operar a 23 pacientes (1-49), para el 2 en 22 pacientes (1-49) y para el 3 en 33 pacientes (15-44), alcanzando una competencia global del 60% con la realización de 42 casos, del 80% con 51 casos y del 100% con 55 casos. El amplio rango de casos que sesga cada resultado proviene de la falta de diferenciación del progreso alcanzado según el año de MIR. No obstante, nuestra experiencia con la utilización sistemática de Osirix® en la planificación quirúrgica y con la obtención de prototipos rápidos estereolitográficos en 3D mejora estos resultados. La competencia de los residentes en los hitos quirúrgicos se alcanza con un número inferior de pacientes, de una forma mucho más rápida, independientemente de la habilidad natural del residente para la cirugía y en el comprimido tiempo de formación de 4 años que normativamente existe en España. El número de residentes que han participado en la validación de nuestro proceso es reducido, al haberse limitado únicamente a nuestro centro, pero es previsible que la extensión de este modelo a más centros pueda ofrecer un número superior de residentes para validar la inclusión de esta metodología en sus itinerarios docentes de forma sistemática.

Conclusiones

La utilización sistemática de Osirix® para visualización y tratamiento autónomo de imágenes nasosinuales en 3D desde archivos DICOM permite a los cirujanos efectuar las cirugías endoscópicas nasosinuales con mayor confianza y seguridad y en menos tiempo que utilizando imágenes en 2D. Los residentes también alcanzan la competencia quirúrgica más rápidamente, con mayor seguridad y con menos complicaciones. La mejora en la planificación se incrementa cuando el equipo quirúrgico dispone de prototipos rápidos estereolitográficos en los casos de mayor complejidad.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Agradecimientos

Los autores agradecen a Juan José Olmo Bordallo su inestimable colaboración en la construcción de los prototipos rápidos estereolitográficos.

Bibliografía

- Huang BY, Lloyd KM, DelGaudio JM, Jablonowski E, Hudgins PA. Failed endoscopic sinus surgery: Spectrum of CT findings in the frontal recess. *Radiographics*. 2009;29:177-95.
- Lund VJ, Fokkens WJ, Beale T, Bernal-Sprekelsen M, Eloy P, et al. European position paper on the anatomical terminology of the internal nose and paranasal sinuses. *Rhinology*. 2014;50(Suppl. 24).
- Buckle CE, Udawatta V, Straus CM. Now you see it, now you don't: Visual illusions in radiology. *Radiographics*. 2013;33:2087-102.
- Wormald PJ. Endoscopic sinus surgery: Anatomy, three-dimensional reconstruction and surgical technique. Thieme. 2013.
- Govindaraj S, Adappa ND, Kennedy DW. Endoscopic sinus surgery: Evolution and technical innovations. *J Laryngol Otol*. 2010;124:242-50.
- Kurt S, Schramm A, Gellrich NC. La navegación quirúrgica en el campo de la cirugía craneofacial: Una revisión y evaluación de la tecnología y sus aplicaciones prácticas. *Cirugía Plástica*. 2001;11:131-42.
- Rosset A, Spadola L, Ratib O. OsiriX: An open-source software for navigating in multidimensional DICOM images. *J Digit Imag*. 2004;17:205-16.
- Shamshuddin S, Matthews HR. Use of Osirix in developing a digital radiology teaching library. *Clin Radiol*. 2014;69:e373-80.
- Osirix Imaging Software. Advanced Open-Source PACS Workstation DICOM Viewer. [consultado 26 Dic 2014]. Disponible en: <http://www.osirix-viewer.com/Downloads.html>
- Kim G1, Jung HJ, Lee HJ, Lee JS, Koo S, Chang SH. Accuracy and reliability of length measurements on three-dimensional computed tomography using open-source OsiriX software. *J Digit Imaging*. 2012;25:486-91.
- Mankovich NJ, Cheeseman AM, Stoker NG. The display of three-dimensional anatomy with stereolithographic models. *J Digit Imaging*. 1990;3:200-3.
- Taft RM, Kondor S, Grant GT. Accuracy of rapid prototype models for head and neck reconstruction. *J Prosthet Dent*. 2011;106:399-408.
- Frühwald J, Schicho KA, Figl M, Benesch T, Watzinger F, Kainberger F. Accuracy of craniofacial measurements: Computed tomography and three-dimensional computed tomography compared with stereolithographic models. *J Craniofac Surg*. 2008;19:22-6.
- American Academy of Otolaryngology-Head and Neck Surgery (AAO-HNS). Intra-Operative Use of Computer Aided Surgery. Position Statement, Reimbursement. Approved 2002 Nov. Revised 2014 March. [consultado 26 Dic 2014]. Disponible en: <http://www.entnet.org/content/intra-operative-use-computer-aided-surgery>.
- Vaid S, Vaid N, Rawata S, Ahuja AT. An imaging checklist for pre-FESS CT: Framing a surgically relevant report. *Clin Radiol*. 2011;66:459-70.
- Hart SG, Staveland LE. Development of NASA-TLX (task load index): Results of empirical and theoretical research. En: Hancock PA, Meshkati N, editores. *Human Mental Workload*. Amsterdam, the Netherlands: Elsevier; 1988. p. 139-78.
- Lin S, Laeeq K, Ishii M. Development and pilot testing of a feasible, reliable, and valid operative competency assessment tool for the endoscopic sinus surgery. *Am J Rhinol Allergy*. 2009;23:354-9.
- Laeq K, Lin SY, Diaz DA, Lane AP, Reh D, Bhatti NI. Achievement of competency in endoscopic sinus surgery of otolaryngology residents. *Laryngoscope*. 2013;123:2932-4.

19. Haerle SK, Daly MJ, Chan HH, Vescan A, Kucharczyk W, Irish JC. Virtual surgical planning in endoscopic skull base surgery. *Laryngoscope*. 2013;123:2935–9.
20. Ramakrishnan VR, Kingdom TT, Nayak JV, Hwang PH, Orlandi RR. Nationwide incidence of major complications in endoscopic sinus surgery. *Int Forum Allergy Rhinol*. 2012;2:34–9.
21. Mandel M, Amorim R, Paiva W, Prudente M, Teixeira MJ, Ferreira A. 3D preoperative planning in the ER with OsiriX®: When there is no time for neuronavigation. *Sensors*. 2013;13:6477–91.
22. Grzegorzec T, Kolebacz B, Stryjewska-Makuch G, Kasperska-Zajac A, Misiotek M. The influence of selected preoperative factors on the course of endoscopic surgery in patients with chronic rhinosinusitis. *Adv Clin Exp Med*. 2014;23:69–78.
23. Korves B, Klimek L, Klein HM, Mösges R. Image and model-based surgical planning in otolaryngology. *J Otolaryngol*. 1995;24:265–70.
24. Begall K, Vorwerk U. Artificial petrous bone produced by stereolithography for microsurgical dissecting exercises. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 1998;60:241–5.
25. Grolmana W, Schouwenburga PF, Verbeeten B, Maarten F, de Boer MF, Meeuwisc CA. Three-dimensional models of the tracheostoma using stereolithography. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*. 1995;57:338–42.
26. Kapakin S. Stereolithographic biomodelling to create tangible hard copies of the ethmoidal labyrinth air cells based on the visible human project. *Folia Morphol (Warsz)*. 2011;70:33–40.
27. Heichel DJ, Boyd EM. The use of stereolithography in head and neck reconstruction. *Otolaryngol Head Neck Surg*. 1999;121:P173.
28. Staudenmaier R, Naumann A, Aigner J, Brüning R, Englmeier KH, Grohader K. Ear reconstruction supported by a stereolithographic model. *Plast Reconstr Surg*. 2000;106:511.
29. Schwaderer E, Bode A, Budach W, Claussen CD, Dammann F, Kaus T, et al. Soft-tissue stereolithographic model as an aid to brachytherapy. *Medica Mundi*. 2000;44:48–51.
30. Müller A, Krishnan KG, Uhl E, Mast G. The application of rapid prototyping techniques in cranial reconstruction and preoperative planning in neurosurgery. *J Craniofac Surg*. 2003;14:899–914.
31. Levine JP, Patel A, Saadeh PB, Hirsch DL. Computer-aided design and manufacturing in craniomaxillofacial surgery: The new state of the art. *J Craniofac Surg*. 2012;23:288–93.
32. Baran A, Gunbey E, Babademez MA. Utilization and dissection for endoscopic sinus surgery training in the residency program. *J Craniofac Surg*. 2010;21:1715–8.
33. Sgambatti L, Gil M, Franco F, de la Fuente R, del Rey F, Batuecas A. Complicaciones de la cirugía endoscópica nasosinusal en un programa de entrenamiento de residentes. *Acta Otorrinolaringol Esp*. 2010;61:345–50.
34. Gross RD, Sheridan MF, Burgess LP. Endoscopic sinus surgery complications in residency. *Laryngoscope*. 1997;107:1080–5.