



Artículo Aceptado para su pre-publicación / Article Accepted for pre-publication

Título / Title:

Modelado 3D de la vía aérea para la predicción de vía aérea difícil: aplicación clínica en pacientes con anomalías craneofaciales / 3D airway modeling for difficult airway prediction: clinical application in patients with craniofacial anomalies.

Autores / Authors:

Xabier Lema Torre, José Luis del Castillo Pardo de Vera, Martín Andura Correas, José Luis Cebrián Carretero, María Trincado Cobos, Ruben Rubio Bolívar, José Tadeo Borjas Gómez, María del Carmen Hernández Gancedo, Blanca Tapia Salinas

DOI: [10.20986/recom.2025.1645/2025](https://doi.org/10.20986/recom.2025.1645/2025)

Instrucciones de citación para el artículo / Citation instructions for the article:

Lema Torre Xabier , del Castillo Pardo de Vera José Luis, Andura Correas Martín, Cebrián Carretero José Luis, Trincado Cobos María, Rubio Bolívar Ruben, Borjas Gómez José Tadeo, Hernández Gancedo María del Carmen , Tapia Salinas Blanca. Modelado 3D de la vía aérea para la predicción de vía aérea difícil: aplicación clínica en pacientes con anomalías craneofaciales / 3D airway modeling for difficult airway prediction: clinical application in patients with craniofacial anomalies.. j.maxilo 2025. doi: 10.20986/recom.2025.1645/2025.



Este es un archivo PDF de un manuscrito inédito que ha sido aceptado para su publicación en la *Revista Española de Cirugía Oral y Maxilofacial*. Como un servicio a nuestros clientes estamos proporcionando esta primera versión del manuscrito en estado de prepublicación. El manuscrito será sometido a la corrección de estilo final, composición y revisión de la prueba resultante antes de que se publique en su forma final. Tenga en cuenta que durante el proceso de producción se pueden dar errores, lo que podría afectar el contenido final. El copyright y todos los derechos legales que se aplican al artículo pertenecen a la *Revista Española de Cirugía Oral y Maxilofacial*.

MODELADO 3D DE LA VÍA AÉREA PARA LA PREDICCIÓN DE VÍA AÉREA DIFÍCIL: APLICACIÓN CLÍNICA EN PACIENTES CON ANOMALÍAS CRANEOFACIALES

3D AIRWAY MODELING FOR DIFFICULT AIRWAY PREDICTION: CLINICAL APPLICATION IN PATIENTS WITH CRANIOFACIAL ANOMALIES

Xabier Lema Torre¹, José Luis del Castillo Pardo de Vera², Martín Andura Correas², José Luis Cebrián Carretero², María Trincado Cobos¹, Rubén Rubio Bolívar³, Tadeo Borja³, María del Carmen Hernández Gancedo¹, Blanca Tapia Salinas¹

¹ Servicio de Anestesiología y Reanimación. Hospital Universitario La Paz. Madrid, España.

²Servicio de Cirugía Oral y Maxilofacial. Hospital Universitario La Paz. Madrid, España.

³Laboratorio 3D. Hospital Universitario La Paz. Madrid, España

CORRESPONDENCIA

Martín Andura Correas

Correo electrónico: martin260297@gmail.com

Recibido: 21-06-2025

Aceptado: 26-09-2025

RESUMEN

Introducción: La predicción de la vía aérea difícil en pacientes con malformaciones craneofaciales representa un desafío para anestesiología y cirugía maxilofacial. En síndromes como Treacher Collins o CHARGE, las alteraciones anatómicas complejas limitan la eficacia de la evaluación clínica convencional. La impresión 3D ofrece una herramienta innovadora para reproducir la anatomía individual y optimizar la planificación anestésica. Los objetivos de este trabajo fueron seleccionar en pacientes con síndromes craneofaciales el diámetro y la longitud adecuados del tubo endotraqueal, identificar la fosa nasal favorable para la intubación, simular trayectos del tubo con posibles angulaciones y stops, y valorar la

factibilidad de fabricar tubos a medida en situaciones en las que los tubos disponibles no se adaptaban a la anatomía de los pacientes.

Materiales y métodos: Se presenta una revisión de las ventajas del modelado 3D de la vía aérea basado en imágenes tomográficas, con una experiencia clínica aplicada a 5 pacientes pediátricos con síndromes de malformación craneofacial. El enfoque se centra en su utilidad para la predicción de la vía aérea difícil, planificación anestésica y entrenamiento clínico.

Resultados: El uso de modelos impresos en 3D ha demostrado mejorar la anticipación de dificultades técnicas durante la intubación, reducir tiempos de manejo de la vía aérea y mejorar la comunicación interdisciplinar. En el caso específico de pacientes con Treacher Collins y otras dismorfias faciales, permitió identificar rutas más viables para la intubación y estimar calibres adecuados de tubos endotraqueales.

Conclusiones: La impresión 3D de la vía aérea constituye una herramienta eficaz y prometedora en el abordaje de pacientes con vía aérea potencialmente difícil. Su aplicación debe ser considerada como complemento a la valoración clínica habitual en contextos complejos, y su uso se prevé en expansión a otros perfiles de pacientes.

Palabras clave: Vía aérea difícil, impresión 3D, Treacher Collins, simulación, anestesia, planificación quirúrgica, malformaciones craneofaciales.

ABSTRACT

Introduction: The prediction of a difficult airway represents a significant challenge in anesthesiology and maxillofacial surgery. In patients with craniofacial abnormalities, such as Treacher Collins syndrome, conventional airway evaluation may be insufficient. 3D printing offers a novel tool for the personalized study of airway anatomy. Although this technology has potential applications across a wide range of pathologies, its current clinical use has focused on patients with craniofacial malformations, establishing an innovative protocol in this context. The present clinical experience is based on a group of patients with craniofacial malformations but is proposed as a model extendable to other types of patients with complex anatomies.

Materials and methods: This study presents a review of the advantages of 3D airway modeling based on tomographic imaging, with clinical experience applied to 5 pediatric patients with craniofacial malformation syndromes. The approach focuses on its usefulness for difficult airway prediction, anesthetic planning, and clinical training.

Results: The use of 3D-printed models has shown improved anticipation of technical difficulties during intubation, reduced airway management times, and enhanced interdisciplinary communication. Specifically, in patients with Treacher Collins and other facial dysmorphisms, the models enabled the identification of more viable intubation routes and the estimation of appropriate endotracheal tube sizes.

Conclusions: 3D airway printing is an effective and promising tool in the management of patients with potentially difficult airways. Its application should be considered as a complement to standard clinical evaluation in complex scenarios, and its use is expected to expand to other patient profiles.

Keywords: Difficult airway, 3D printing, Treacher Collins, simulation, anesthesia, surgical planning, craniofacial malformations.

INTRODUCCIÓN

El manejo seguro de la vía aérea continúa siendo uno de los principales retos clínicos en anestesiología y cirugía maxilofacial. La predicción precoz de una vía aérea difícil y la planificación individualizada del abordaje son fundamentales para reducir la morbilidad perioperatoria¹.

En pacientes con malformaciones craneofaciales, como el síndrome de Treacher Collins, la evaluación convencional de la vía aérea resulta frecuentemente insuficiente debido a las complejas alteraciones anatómicas presentes^{2,3}. Este síndrome, caracterizado por hipoplasia mandibular, malformaciones auriculares y otras dismorfias faciales, presenta una alta incidencia de dificultades respiratorias y de intubación⁴.

Frente a estas limitaciones, el modelado tridimensional (3D) mediante impresión basada en tomografías computarizadas ha emergido como una herramienta altamente innovadora. Esta técnica permite reproducir con fidelidad la anatomía individual del paciente y facilita la

planificación anestésica y quirúrgica^{5,6}. Si bien la experiencia clínica inicial descrita en este trabajo se ha centrado exclusivamente en pacientes con síndromes de malformación craneofacial, la intención es validar este enfoque para su aplicación futura en otros contextos clínicos complejos, incluyendo pacientes oncológicos, traumatológicos o pediátricos con alteraciones estructurales adquiridas.

Los objetivos de este trabajo fueron seleccionar en pacientes con síndromes craneofaciales el diámetro y la longitud adecuados del tubo endotraqueal, identificar la fosa nasal favorable para la intubación, simular trayectos del tubo con posibles angulaciones y stops, y valorar la factibilidad de fabricar tubos a medida en situaciones en las que los tubos disponibles no se adaptaban a la anatomía de los pacientes⁷.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó una revisión narrativa de la literatura y se presenta una experiencia clínica con 5 pacientes diagnosticados con síndromes de malformación craneofacial sometidos a intervención quirúrgica. Todos los casos fueron evaluados por el equipo de anestesia y cirugía maxilofacial.

La cohorte incluyó a 5 pacientes entre 17 y 23 años (2 mujeres, 3 varones). Tres presentaban síndrome de Treacher Collins y 2 síndrome CHARGE (coloboma, cardiopatía congénita, atresia de coanas, retraso del crecimiento y desarrollo, anomalías genitales y auriculares). Los criterios de inclusión en el estudio fueron los siguientes: diagnóstico confirmado de síndrome craneofacial (Treacher Collins o CHARGE), edad ≥ 16 años, disponibilidad de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT, del inglés *Cone Beam Computed Tomography*) de calidad diagnóstica, indicación de cirugía bajo anestesia general, consentimiento informado del paciente o tutores legales. Por otro lado, se excluyeron todos aquellos estudios en los que los pacientes presentaban imágenes tomográficas incompletas o de baja calidad para segmentación 3D, presencia de patología respiratoria aguda que pudiera modificar temporalmente la anatomía, contraindicación médica para anestesia general o negativa expresa a la utilización de modelos 3D con fines clínicos y docentes.

La revisión de literatura se llevó a cabo en PubMed/MEDLINE, Scopus, Embase y Web of Science, seleccionando artículos publicados en los últimos 15 años sobre impresión 3D, vía

aérea difícil, síndromes craneofaciales y planificación anestésica.

A partir de CBCT individuales se generaron modelos virtuales mediante el software libre 3D Slicer (Figuras 1, 2 y 3). Cada modelo fue refinado posteriormente con Meshmixer y finalmente impreso en resina flexible mediante tecnología de estereolitografía (SLA) (Figuras 4 y 5). Estos modelos fueron empleados en la etapa preoperatoria con fines de planificación, simulación de maniobras de intubación y entrenamiento del equipo clínico (Figuras 6 y 7).

RESULTADOS

El modelo tridimensional permitió:

- **Visualización precisa de obstrucciones anatómicas:** Se identificó la imposibilidad de intubación por una de las fosas nasales debido a atrapamiento del broncoscopio en el cornete inferior, hallazgo que no se detectó previamente con imágenes 2D.
- **Selección de la vía más viable:** Se ensayaron distintas rutas de intubación y calibres de tubos en el modelo físico, identificando la combinación más segura.
- **Planificación y entrenamiento:** El modelo sirvió como simulador anatómico, lo que permitió al equipo anticipar complicaciones y coordinar la intervención con mayor eficiencia.
- **Mejora en tiempos de intubación y reducción de errores:** Se seleccionó de antemano un broncoscopio de 4,7 mm y tubo nasal de 6 mm, evitando intentos fallidos intraoperatorios.

DISCUSIÓN

La impresión 3D ha demostrado superar una de las principales limitaciones de las imágenes diagnósticas convencionales: la dificultad para representar la complejidad tridimensional de la vía aérea. En pacientes con anatomías alteradas, como en el síndrome de Treacher Collins, la correlación entre la imagen radiológica y la realidad anatómica es a menudo deficiente. El modelo físico permite una interacción directa con la vía aérea del paciente, mejorando la predicción clínica^{8,9}.

Además de sus beneficios en planificación, la impresión 3D tiene un importante valor pedagógico. En anestesia, donde la variabilidad anatómica puede implicar un riesgo vital, disponer de un modelo realista permite al personal practicar maniobras complejas sin

comprometer la seguridad del paciente¹⁰.

Esta tecnología también mejora la comunicación entre anestesistas, cirujanos y personal de enfermería, al proporcionar un punto de referencia visual y táctil común. De esta forma, se facilita la toma de decisiones interdisciplinaria basada en datos anatómicos concretos.

No obstante, se deben reconocer algunas limitaciones: los tiempos de producción (entre 8 y 14 h), el coste de los materiales y la escasa representación de tejidos blandos móviles. No obstante, la rápida evolución de la tecnología y el desarrollo de materiales más avanzados podrían solventar estos obstáculos en un futuro cercano⁶.

El número de estudios específicos en anestesiología pediátrica aún es limitado, aunque publicaciones recientes destacan la utilidad de la impresión 3D en la simulación y planificación de casos complejos^{5,11}.

CONCLUSIONES

La impresión 3D de la vía aérea representa una herramienta revolucionaria para el abordaje clínico de pacientes con anatomía compleja. En casos de malformaciones craneofaciales, su uso permite una planificación individualizada, mejora la predicción de la vía aérea difícil y facilita la formación y coordinación del equipo médico.

Aunque por ahora su implementación está centrada en casos de alta complejidad como el síndrome de Treacher Collins, se prevé que en el futuro esta tecnología se expanda a otras patologías, consolidándose como un recurso habitual en la práctica clínica anestésica y quirúrgica.

CONFLICTOS DE INTERESES

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

FUENTES DE FINANCIACIÓN

Este estudio no ha recibido financiación específica de agencias públicas, del sector comercial o entidades sin ánimo de lucro.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society of Anesthesiologists. Practice guidelines for management of the difficult airway. *Anesthesiology*. 2022;136(1):e10-e33.
2. Trainor PA, Dixon J, Dixon MJ. Treacher Collins syndrome: Etiology, pathogenesis, and prevention. *Eur J Hum Genet*. 2009;17(3):275-83. DOI: 10.1038/ejhg.2008.221.
3. Algerian A, Gilardino MS. Treacher Collins syndrome. *Clin Plast Surg*. 2019;46(2):197-205. DOI: 10.1016/j.cps.2018.11.005.
4. Hosking J, Zoanetti D, Carlyle A, Anderson P, Costi D. Anesthesia for Treacher Collins syndrome: A review of airway management in 240 pediatric cases. *Pediatr Anesth*. 2012;22(8):752-58. DOI: 10.1111/j.1460-9592.2012.03829.x.
5. Chao I, Young J, Coles-Black J, Chuen J, Weinberg L, Rachbuch C. The application of three-dimensional printing in anaesthesia: A systematic review. *Anaesthesia*. 2017;72(5):641-50. DOI: 10.1111/anae.13812.
6. Martelli N, Serrano C, van den Brink H, Pineau J, Prognon P, Borget I, et al. Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: A systematic review. *Surgery*. 2016;159(6):1485-500. DOI: 10.1016/j.surg.2015.12.017.
7. Tapia Salinas B, Rubio Arbolí L, Trincado Cobos M, Murillo Juliá A, Aragón Niño I, del Castillo Pardo de Vera JL, et al. Airway management in CHARGE syndrome, devising a well tolerated approach. *Eur J Anaesthesiol Intensive Care Med*. 2025;4(4):1(e00001). DOI:10.1097/EA9.000000000000077. DOI: 10.1097/EA9.000000000000077.
8. McMenamín P, Quayle M, McHenry C, Adams J. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology. *Anat Sci Educ*. 2014;7(6):479-86. DOI: 10.1002/ase.1475.
9. Byrne T, Yong S, Steinfort D. Development of a low-cost 3D-printed airway model for bronchoscopy training. *J Bronchology Interv Pulmonol*. 2016;23(3):251-4. DOI: 10.1097/LBR.0000000000000257.
10. Wiesel O, Jaklitsch M, Fisichella P. Three-dimensional printing models in surgery. *Surgery*. 2016;160(3):815-7. DOI: 10.1016/j.surg.2016.01.002.

11. Cohen A, Laviv A, Berman P, Nashef R, Abu-Tait J. Mandibular reconstruction using stereolithographic 3-dimensional printing modeling technology. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod.* 2009;108(5):661-6. DOI: 10.1016/j.tripleo.2009.05.023.

Prepublicación

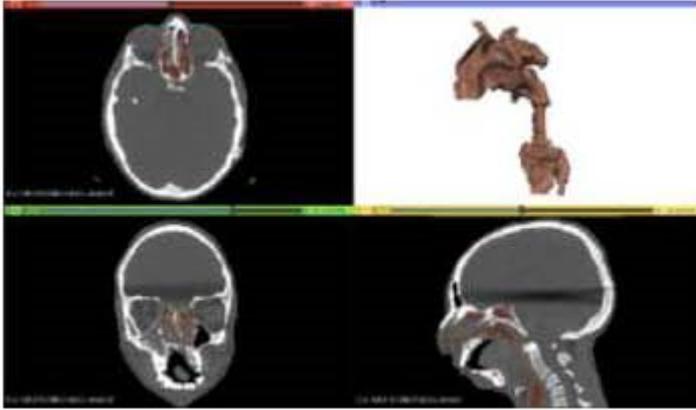


Figura 1. Segmentación de la vía aérea a partir de imágenes de tomografía computarizada de haz cónico (CBCT).

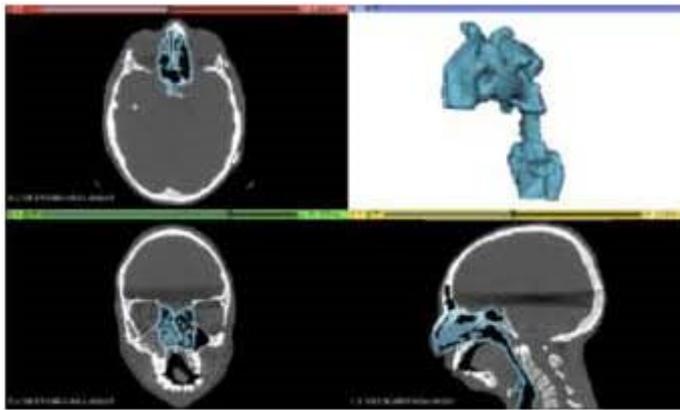


Figura 2. Segmentación de 3 mm de tejido circundante a la vía aérea.

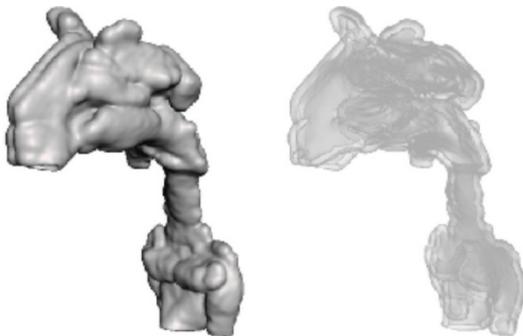


Figura 3. Reconstrucción final de vía aérea a partir de imágenes obtenidas por tomografía computarizada de haz cónico (CBCT).

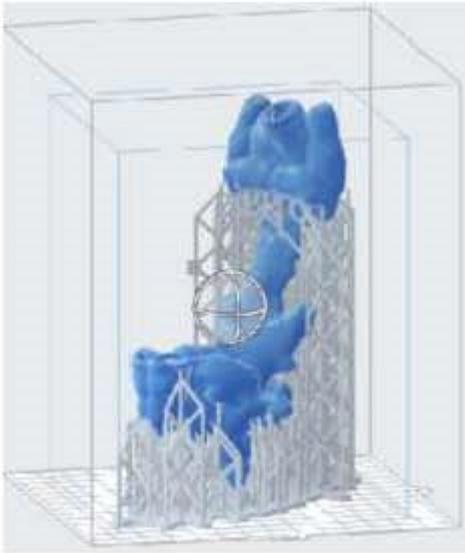


Figura 4. Modelo 3D previa impresión.



Figura 5. Modelo final de la vía aérea.



il del modelo.

Figura 7. Utilización de guía endotraqueal para posterior progresión de tubo endotraqueal del número 6 a través de fosa nasal en el modelo.