

REPORTE DE EXPERIENCIA TÉCNICA

Manufactura aditiva en la planificación quirúrgica: experiencia técnica del FabLab-CUNOC

Additive Manufacturing in Surgical Planning: Technical Experience of the FabLab-CUNOC

Oscar Maldonado • Karin Rivas

FabLab, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala, Quetzaltenango, Guatemala

Autor de correspondencia: Oscar Maldonado · omaldonado@cunoc.edu.gt

RESUMEN

Objetivo: Describir el proceso técnico de obtención de modelos anatómicos tridimensionales mediante manufactura aditiva por deposición fundida (FDM) en el FabLab del Centro Universitario de Occidente (CUNOC-USAC), destacando la integración de la ingeniería mecánica e industrial para resolver problemas clínicos regionales. **Método:** Se documentó un flujo de trabajo fundamentado en una revisión narrativa de literatura científica y en la experiencia empírica acumulada durante cuatro años de operación del FabLab, mediante el procesamiento de archivos tomográficos provenientes de instituciones de salud locales. **Resultados:** Se consolidó un flujo de bajo costo: adquisición DICOM, segmentación en InVesalius, optimización de malla en Meshmixer, laminado en Ultimaker CURA e impresión FDM con ácido poliláctico (PLA). **Conclusiones:** La manufactura aditiva en el punto de atención es viable en el occidente de Guatemala con recursos accesibles y con control sistemático de las variables de manufactura.

Palabras clave: manufactura aditiva; impresión 3D médica; planificación quirúrgica; FabLab; ingeniería aplicada; entornos de recursos limitados

ABSTRACT

Objective: To describe the technical workflow for obtaining three-dimensional anatomical models through fused deposition modeling (FDM) at the Centro Universitario de Occidente (CUNOC-USAC) FabLab, highlighting the integration of mechanical and industrial engineering to address regional clinical challenges. **Method:** A workflow was documented through a narrative literature review and empirical experience accumulated over four years of FabLab operations, using computed tomography datasets obtained from local healthcare institutions. **Results:** A low-cost process was consolidated: DICOM acquisition, InVesalius segmentation, Meshmixer mesh optimization, Ultimaker CURA slicing, and FDM printing with polylactic acid (PLA). **Conclusions:** Point-of-care additive manufacturing is feasible in western Guatemala through accessible resources and systematic control of manufacturing variables.

Keywords: additive manufacturing; medical 3D printing; surgical planning; FabLab; applied engineering; resource-limited settings

INTRODUCCIÓN

La medicina personalizada permite trasladar la información de imágenes bidimensionales a modelos físicos tridimensionales mediante manufactura aditiva. Estos biomodelos facilitan la

apreciación háptica de la anatomía y la planificación de abordajes quirúrgicos complejos, particularmente en ortopedia y traumatología.^{1,2}

En la salud pública del occidente de Guatemala, el acceso a servicios centralizados de impresión 3D médica es limitado por costos y centralización.

Durante cuatro años, el Laboratorio de Fabricación Digital (FabLab) del Centro Universitario de Occidente (CUNOC) ha desarrollado soluciones locales con tecnología de modelado por deposición fundida (FDM), a partir de revisión técnica, lectura de literatura de acceso libre y un proceso documentado de prueba y error.

La literatura clínica puede simplificar variables de manufactura que condicionan la fidelidad dimensional del producto final. La integración de ingeniería mecánica e industrial permite abordar materiales, reología, tolerancias, orientación de capas, gestión de calidad, optimización de recursos y estandarización de procesos. Este enfoque se vincula con el concepto de manufactura en el punto de atención.^{3,4}

El objetivo de este reporte de experiencia técnica es describir el flujo de trabajo para obtener modelos anatómicos de bajo costo optimizados en el FabLab-CUNOC y señalar los controles aplicados para su uso en planificación quirúrgica.

EXPERIENCIA TÉCNICA: CADENA DE MANUFACTURA DIGITAL

El flujo implementado se basa en herramientas de software libre y hardware de escritorio. Comprende tres etapas críticas, controladas con principios de ingeniería.

Adquisición de imagen médica y gestión DICOM. El proceso inicia con tomografías computarizadas provenientes de centros de radiología locales. Se revisan parámetros como el espesor de corte, idealmente menor de 1 mm, para reducir el efecto de volumen parcial, así como la presencia de artefactos metálicos que pueden generar errores geométricos. Cuando es necesario, se emplean estrategias de reducción de artefactos

y segmentación del sinograma para proteger la exactitud anatómica.^{5,6,7}

Postprocesamiento digital, segmentación y optimización de malla. Se utiliza InVesalius, software de código abierto, para aplicar umbrales de unidades Hounsfield y aislar la estructura ósea de interés. El resultado se exporta como malla STL. Posteriormente, el archivo se procesa en Meshmixer para eliminar componentes aislados, cerrar bordes abiertos, suavizar selectivamente superficies y aplicar holguras mecánicas que compensen la contracción esperada del material.^{8,9}

Parámetros de manufactura y laminado. El archivo STL optimizado se importa en Ultimaker CURA para convertirlo a código G. La orientación de construcción se selecciona para disminuir los soportes sacrificiales y mitigar la anisotropía del eje Z. También se controlan altura de capa, velocidad de deposición, temperatura del extrusor y de la cama, y patrón de relleno, para obtener piezas adecuadas para manipulación preoperatoria.^{5,8,10}

RESULTADOS Y EVALUACIÓN METROLÓGICA

El flujo consolidado tras cuatro años de pruebas funcionales se resume así: imagen médica DICOM → InVesalius (STL) → Meshmixer (edición) → Ultimaker CURA (código G) → impresión FDM (PLA).

Ante la ausencia de escáneres metrológicos industriales y laboratorios biológicos de alta complejidad para certificación interna, la validación se realiza mediante comparación de medidas físicas directas por personal médico frente a las dimensiones del modelo digital. La experiencia reporta un margen de error menor de 1 mm para biomodelos destinados a planificación preoperatoria táctil.⁵

TABLA 1. EVIDENCIA APLICADA AL FLUJO TÉCNICO

Referencia	Aportación clave	Aplicación metodológica en el FabLab-CUNOC
Andrés-Cano et al. (2021) ³	Analiza las aplicaciones de la impresión 3D y los aspectos de responsabilidad y regulación vinculados con la medicina personalizada.	Delimita la responsabilidad del diseño técnico y requiere validación final del biomodelo por el cirujano especialista.

Referencia	Aportación clave	Aplicación metodológica en el FabLab-CUNOC
Garay et al. (2024) ¹¹	Describe una serie de casos de uso de modelos impresos en 3D en ortopedia y traumatología para planificación y pre-moldeado de placas.	Orienta el uso de modelos estáticos de PLA para planificación preoperatoria ortopédica y simulación táctil fuera del paciente.

Nota: síntesis adaptada exclusivamente de las fuentes verificadas y citadas en el manuscrito.

MODELO MULTIDISCIPLINARIO Y ROL DEL INGENIERO

La manufactura aditiva médica requiere una cadena multidisciplinaria desde la adquisición de imagen hasta la fabricación del prototipo. La interacción entre ingeniería, cirugía, radiología y otros profesionales es necesaria para establecer controles de calidad y utilidad clínica.^{1,2,8}

Dentro de este modelo, el ingeniero mecánico e industrial interviene en la selección de parámetros de imagen, verificación de vóxel isotrópico, control del volumen parcial, umbralizado de densidades Hounsfield, filtrado de artefactos, corrección topológica de mallas STL, selección de materiales, orientación de impresión, cálculo de soportes y estimación de tiempos de producción.

En el FabLab-CUNOC, los archivos DICOM se obtienen en colaboración con servicios de radiología de Quetzaltenango. El laboratorio opera impresoras FDM para desarrollar biomodelos estáticos con destino a planificación quirúrgica preoperatoria y a la comunicación médico-paciente. Se utiliza InVesalius como software de segmentación y PLA como material de bajo costo disponible localmente.^{1,2,5}

Este reporte consolida la base metodológica del proceso; publicaciones posteriores podrán documentar casos clínicos específicos en los que el flujo sea aplicado en colaboración con profesionales de salud del occidente guatemalteco.

DISCUSIÓN

La experiencia del FabLab-CUNOC ilustra que la brecha tecnológica puede reducirse mediante investigación aplicada impulsada por la academia. Si bien la literatura internacional describe tecnologías de mayor complejidad y materiales

especializados, el contexto regional demanda optimizar el uso de FDM y PLA disponible localmente.

El PLA es un polímero de bajo costo empleado para el modelado de estructuras óseas; sin embargo, sus propiedades térmicas limitan su exposición a métodos convencionales de esterilización por vapor. Por ello, el enfoque descrito se circunscribe al pre-moldeado de placas de osteosíntesis y a la simulación preoperatoria táctil fuera del paciente, no a guías de corte que entren en contacto con tejidos estériles.^{11,12}

La experiencia empírica ha permitido documentar ajustes de reología, contracción térmica residual, orientación de capas y estandarización de tiempos de entrega. La combinación de estas variables con la optimización de recursos contribuye a disminuir impresiones fallidas y a resolver problemas clínicos regionales con un enfoque técnico sistemático.

CONCLUSIONES

- 1. El flujo digital DICOM → InVesalius → Meshmixer → Ultimaker CURA → FDM es reproducible en el occidente de Guatemala mediante software de acceso libre y PLA disponible localmente.
- 2. La limitación de tecnología de alto costo no impide elaborar biomodelos con utilidad para planificación preoperatoria, siempre que se controlen las variables de imagen, segmentación y manufactura.
- 3. La participación del ingeniero en investigación aplicada integra los aspectos de materiales y procesos con la gestión de calidad y la optimización de recursos en entornos de punto de atención.
- 4. La experiencia técnica documentada establece una base metodológica para futuros reportes de casos clínicos desarrollados en colaboración con el sistema de salud pública del occidente del país.

DECLARACIONES

Conflictos de interés: no declarados en el manuscrito fuente.

Financiamiento: no declarado en el manuscrito fuente.

Ética y confidencialidad: el reporte describe una experiencia técnica de procesamiento y manufactura. No incorpora imágenes, identificadores directos ni datos clínicos individualizables.

REFERENCIAS

1. Rengier F, Mehndiratta A, von Tengg-Kobligh H, Zechmann CM, Unterhinninghofen R, Kauczor HU, et al. 3D printing based on imaging data: review of medical applications. *Int J Comput Assist Radiol Surg.* 2010;5(4):335-41. doi: 10.1007/s11548-010-0476-x.
2. Anagnostopoulos S, Baltayiannis N, Koletsis NE, Mulita F, Spanou F, Leivaditis V, et al. 3D printing in medicine: bridging imaging, education, and practice. *Arch Med Sci Atheroscler Dis.* 2025;10:e172-e188. doi: 10.5114/amsad/209721.
3. Andrés-Cano P, Calvo-Haro JA, Fillat-Gomà F, Andrés-Cano I, Perez-Mañanes R. Papel del cirujano ortopédico y traumatólogo en la impresión 3D: aplicaciones actuales y aspectos legales para una medicina personalizada. *Rev Esp Cir Ortop Traumatol.* 2021;65(2):138-151.
4. GoEngineer. The industrial clinic: why 3D printing point-of-care is shifting from prototyping to production in 2026. GoEngineer Blog [Internet]. 2026 Feb 14 [citado 2026 Ago 30]. Disponible en: <https://www.goengineer.com/blog/the-industrial-clinic-why-3d-printing-point-of-care-is-shifting-from-prototyping-to-production-in-2026>
5. Nguyen P, Stanislaus I, McGahon C, Pattabathula K, Bryant S, Pinto N, et al. Quality assurance in 3D-printing: A dimensional accuracy study of patient-specific 3D-printed vascular anatomical models. *Front Med Technol.* 2023;5:1097850. doi: 10.3389/fmedt.2023.1097850.
6. Rautio S, Meaney A, Latva-Äijö SM, Agrawal H, Brix M, Jayakody D, et al. Complex wavelet-based sinogram segmentation for metal artifact reduction in cone-beam CT. *Phys Med Biol.* 2026;71(15):155028. doi: 10.1088/1361-6560/ae8fb3.
7. Puvanasunthararajah S, Fontanarosa D, Wille ML, Camps SM. The application of metal artifact reduction methods on computed tomography scans for radiotherapy applications: A literature review. *J Appl Clin Med Phys.* 2021;22(6):198-223. doi: 10.1002/acm2.13255.
8. Chepelev L, Wake N, Ryan J, Althobaity W, Gupta A, Arribas E, et al. Radiological Society of North America (RSNA) 3D printing Special Interest Group (SIG): guidelines for medical 3D printing and appropriateness for clinical scenarios. *3D Print Med.* 2018;4(1):11. doi: 10.1186/s41205-018-0030-y.
9. Sears VA, Morris JM. Establishing a Point-of-Care Virtual Planning and 3D Printing Program. *Semin Plast Surg.* 2022;36(3):133-148. doi: 10.1055/s-0042-1754351.
10. Chae MP, Chung RD, Smith JA, Hunter-Smith DJ, Rozen WM. The accuracy of clinical 3D printing in reconstructive surgery: literature review and in vivo validation study. *Gland Surg.* 2021;10(7):2293-2303. doi: 10.21037/gs-21-264.
11. Garay AL, Cinalli M, Fernández L, Inchaurregui F, Ruesta Alava JA, Arrieta A, et al. Uso de modelos de impresión 3D en Ortopedia y Traumatología: Serie de casos. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol.* 2024;89(3):266-274. doi: 10.15417/issn.1852-7434.2024.89.3.1839.
12. Suffo M, Quiroga-De Castro M, Galán-Romero L, Andrés-Cano P. Intra-hospital patient-specific 3D printed surgical guide for patients with thoracic scoliotic deformities, the collaboration between engineer and surgeon. *3D Print Med.* 2025;11(1):40. doi: 10.1186/s41205-025-00279-6.