

Prototipado de órganos artificiales para entrenamiento en cirugía robótica

Dávila-Vilchis, J. M. ; Zúñiga Avilés, L. A.*; Ramírez-García, N. G.; Vilchis-González, A. H. 

Información del Artículo

Recibido: 1 de marzo, 2026
Aceptado: 10 de junio, 2026

Palabras clave: Órganos Artificiales, Intestino, Riñón, Impresión 3D, Modelos anatómicos, Cirugía Robótica

Resumen

Este artículo presenta el prototipado rápido de órganos artificiales, como modelos anatómicos para entrenamientos quirúrgicos asistidos por sistemas robóticos. Para lograr este objetivo, se propone una metodología integral que combina el diseño, impresión 3D y su fabricación artesanal, la cual está organizada en cuatro etapas 1) definición de criterios de diseño, 2) digitalización y procesamiento de imágenes médicas para la generación de modelos tridimensionales, 3) impresión 3D de modelos anatómicos y/o moldes y 4) fabricación artesanal del órgano mediante técnicas de vaciado en silicón. Los resultados incluyen la producción de modelos de riñón e intestino con dimensiones anatómicas reales y propiedades mecánicas, al ser órganos vitales mayormente utilizados en procedimientos quirúrgicos mínimamente invasivos, como la nefrectomía o laparoscopia, respectivamente. Este estudio aporta una guía metodológica para el diseño y desarrollo de otros órganos artificiales que satisfacen los requerimientos anatómicos necesarios en la formación médica asistida por robots.

1. Introducción

El cuerpo humano está compuesto de múltiples órganos que, en conjunto, conforman sistemas y aparatos encargados de mantener la homeostasis y las funciones vitales del organismo. Entre ellos destacan el corazón, el cerebro, los pulmones, el hígado y los riñones, cuyo daño, disfunción o ausencia puede derivar en enfermedades crónicas, deterioro sistémico e, incluso, la muerte. Por esta razón, el estudio, diagnóstico, tratamiento y abordaje quirúrgico de estos órganos representan una prioridad fundamental en la práctica médica contemporánea.

El corazón forma parte del sistema circulatorio y tiene como función principal bombear sangre a todo el cuerpo, permitiendo el transporte de oxígeno y nutrientes hacia las células [1]. El cerebro, por su parte, integra el sistema nervioso central y actúa como centro de comando del organismo, al regular funciones esenciales mediante conexiones neuronales especializadas, en las que se encuentran la coordinación motora, la percepción sensorial, el razonamiento, la resolución de problemas, las emociones y el aprendizaje, que en conjunto con la médula espinal constituyen el principal centro de correlación e integración de la información nerviosa [2]. Los pulmones, órganos principales del sistema respiratorio, realizan el intercambio gaseoso entre el oxígeno y el dióxido de carbono, mediante estructuras de tejido blando y elástico que se expanden y contraen durante la respiración [3].

El hígado es un órgano esencial para la regulación y el mantenimiento de la homeostasis metabólica, ya que participa en procesos de absorción, síntesis, almacenamiento, metabolismo y redistribución de nutrientes, tales como lípidos, carbohidratos, proteínas y vitaminas [4]. Asimismo, constituye el principal órgano encargado de la detoxificación de compuestos xenobióticos y presentar una elevada capacidad regenerativa ante distintos tipos de daño

[5]. Por otro lado, los riñones, órganos excretores del sistema urinario, se localizan en la región posterior de la cavidad abdominal y tienen como función principal filtrar la sangre para eliminar sustancias de desecho mediante la orina, tales como urea, creatinina, ácido úrico y bilirrubina. Además, contribuyen al mantenimiento del volumen y la composición de los líquidos corporales mediante la excreción regulada de solutos y agua [6].

En el caso del sistema digestivo está constituido por el intestino delgado y grueso, un conjunto de tubos abiertos llamado tracto intestinal, cuya longitud varía entre 6 m y 10 m. El intestino se encarga de cumplir funciones esenciales en la digestión química y la absorción de nutrientes gracias a sus vellosidades y microvellosidades, además de concentrar, almacenar y eliminar los desechos sólidos [7].

Sin embargo, la insuficiencia orgánica de cualquiera de ellos, representa una de las problemáticas más críticas de la medicina contemporánea. A nivel mundial, millones de pacientes permanecen en lista de espera para recibir un trasplante, mientras que la brecha entre la demanda de órganos y la disponibilidad de donantes continúa incrementándose. En México, esta situación es apremiante: al corte de febrero de 2026, se registraron 18,626 personas en lista de espera de un trasplante, de las cuales 16,217 requerían un riñón y 2,181 una córnea. Sin embargo, únicamente alrededor del 20 % de los pacientes que requieren un trasplante logra acceder a uno, de acuerdo con cifras del Centro Nacional de Trasplantes [8].

Frente a esta problemática, se han propuesto tres líneas: 1) el desarrollo de órganos artificiales mecánicos, como el corazón artificial total, sistemas de diálisis renal, los cuales pueden sustituir o sostener parcialmente las funciones vitales, pero aún no son capaces de replicar la complejidad fisiológica del órgano original [9]. 2) la medicina regenerativa cuyo objetivo es reconstruir tejidos y órganos funcionales a partir de células del propio paciente, con el propósito de reducir el rechazo inmunológico y ofrecer soluciones terapéuticas personalizadas [10], [11]. Una aproximación más avanzada de la medicina regenerativa es la bioimpresión mínimamente invasiva, conocida como Minimally Invasive Bioprinting (MIB), una técnica emergente que busca trasladar esta capacidad hacia órganos internos mediante robots suaves que son capaces de ejecutar incisiones mínimas u orificios naturales dentro del cuerpo [12], [13]. 3) el uso de la cirugía robótica es otra técnica quirúrgica mínimamente invasiva, cuyo objetivo es usar brazos robóticos rígidos que actúan como una extensión del cirujano en procedimientos complejos para la remoción de tumores en los órganos dañados, reparación de tejidos, hernias, entre otros [14].

Durante las últimas décadas, la ingeniería biomédica junto con la robótica médica ha desarrollado dispositivos capaces de asumir, parcial o totalmente, las funciones de algunos órganos vitales con la intención de proporcionar una mejor calidad de vida a los pacientes. Además, se han fabricado modelos anatómicos con impresión 3D que combinan ingeniería, sensores y software [15] para asistir en cirugías, rehabilitación, diagnóstico médico y tratamiento de enfermedades y logística hospitalaria [16]. Por ejemplo, en México, algunos hospitales de alta especialidad se han enfocado en prácticas quirúrgicas mínimamente invasivas asistidas donde se emplean robots como el Da Vinci®, ya que ofrecen mayor precisión, menor invasión, menor dolor postoperatorio, y la recuperación es más rápida [17].

Sin embargo, el uso clínico de estos sistemas exige que los especialistas cuenten con formación técnica y entrenamiento específico antes de realizar procedimientos en pacientes. El entrenamiento de cirujanos en prácticas quirúrgicas con robots combina simulación avan-

zada, realidad virtual y práctica supervisada en entornos controlados [18]. Esta formación busca desarrollar habilidades como precisión, coordinación, control de instrumentos, percepción espacial y toma de decisiones en procedimientos mínimamente invasivos. En este contexto, los modelos anatómicos artificiales representan una herramienta relevante para la capacitación quirúrgica, ya que permiten reproducir escenarios clínicos controlados y practicar maniobras como suturas, cortes, disecciones y manipulación de tejidos sin comprometer la seguridad del paciente.

Por lo tanto, este artículo presenta una metodología de diseño para la generación de órganos artificiales destinados a funcionar como modelos anatómicos en entrenamientos quirúrgicos asistidos por sistemas robóticos. La innovación de la metodología se centra en el balance de combinar manufactura aditiva con técnicas artesanales para aceleramiento de prototipado con bajo costo. La propuesta busca permitir que los médicos especialistas realicen prácticas con órganos vitales artificiales, tejidos sintéticos o biomiméticos, con el fin de adquirir sensibilidad táctil, control instrumental, precisión en cortes y dominio de maniobras quirúrgicas mediante brazos robóticos.

El artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección de metodología 2 se describen las etapas de diseño, procesamiento de imágenes, generación de modelos tridimensionales, impresión 3D de moldes y fabricación artesanal mediante vaciado en silicón. Posteriormente, en la sección de resultados 3 se presenta el desarrollo de un modelo de intestino y de riñón con sus características anatómicas, dimensionales y funcionales para su aplicación en entrenamiento quirúrgico mínimamente invasivo. Finalmente, en la sección de conclusiones 4 se discuten los alcances de la metodología propuesta, sus posibles aplicaciones en simulación quirúrgica robótica y su potencial como guía para el desarrollo de nuevos modelos anatómicos artificiales orientados a la formación médica especializada.

2. Metodología

La robótica médica está transformando la práctica clínica en todo el mundo, incluido México, ofreciendo precisión quirúrgica. Por lo que, el uso de modelos anatómicos artificiales es necesario en el entrenamiento y/o capacitación de doctores para simular escenarios reales y garantizar procedimientos más seguros con el manejo de brazos robotizados como el Versius® o el Da Vinci® y los especialistas sean capaces de certificarse en el uso de estos equipos para poder hacer uso de ellos con humanos.

Por lo tanto, este artículo, presenta una metodología integral para el prototipado artesanal de órganos artificiales, específicamente para los órganos vitales que se muestran en la Figura 1. Cabe resaltar que esta metodología no requiere de equipo sofisticado, por lo que puede aplicarse a cualquier otro órgano, para el uso y manejo de robots quirúrgicos que les permitan adquirir sensibilidad táctil lo más real posible a los órganos naturales. La metodología se integra por 4 etapas: 1) definición de criterios, 2) segmentación computacional a partir de imágenes médicas, 3) impresión 3D de los modelos anatómicos y 4) fabricación artesanal a una escala 1:1, como se describe a continuación:

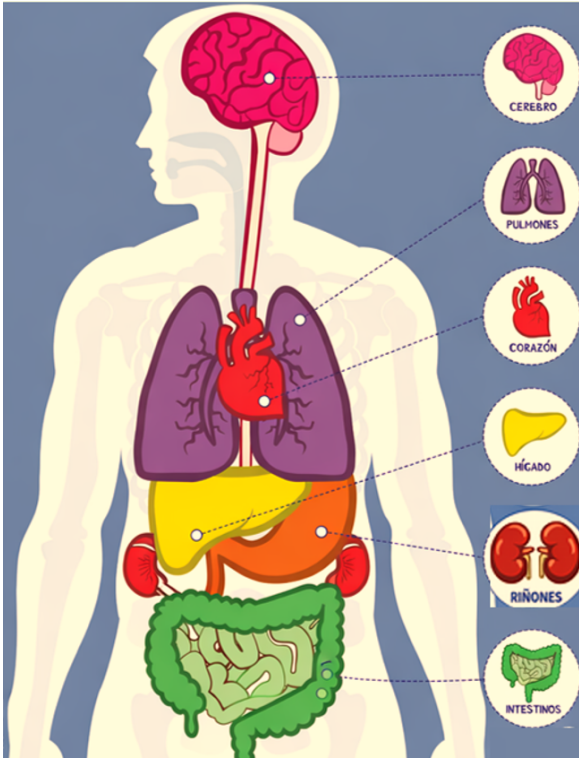


Figura 1: Órganos vitales del ser humano (OpenAI, 2026).

Definición de Criterios de Diseño

El proceso de fabricación de órganos empieza a partir de analizar la anatomía del órgano objetivo para replicar su estructura y/o arquitectura, específicamente forma, tamaño, localización. En conjunto con su fisiología para analizar su funcionamiento, procesos e interacción de sus tejidos y sus propiedades físicas como masa, dimensiones, densidad y módulo de elasticidad E , [19], mostradas en la Tabla 1

Tabla 1: Propiedades de los órganos humanos

Órgano	Masa (g)	Dimensiones (cm)	Densidad (g/cm ³)	E (kPa)
Corazón	280-3450	12x9x6	1.06	20-50
Cerebro	1100-1400	16x14x9	1.03	1
Pulmones	1000	26x15x4	0.24	5-15
Hígado	1400-1800	22x15x10	1.05	0.5-1.5
Riñón	125-170	12x7x3	1.06	2-4
Intestino	2000-4000	700x4x3	1.05	100-300

Para la creación de órganos artificiales es necesario obtener modelos anatómicos con las mismas dimensiones que simulen las propiedades reales del órgano. En este paso es necesario obtener y caracterizar las propiedades mecánicas de rigidez, módulo de elasticidad y dureza, así como sus propiedades reológicas de viscosidad y viscoelasticidad para la selección de los materiales a utilizar, principalmente polímeros y garantizar la similitud anatómica

con los órganos humanos. Por ejemplo, la densidad del tejido pulmonar es muy baja porque está compuesto mayormente por aire.

Procesamiento de imágenes y generación de modelos 3D

Esta etapa consiste en hacer uso de 3D Slicer®, un software de código abierto para la visualización y tratamiento de imágenes médicas en 3D, especialmente obtenidas de tomografías computarizadas (TC) o resonancias magnéticas (MRI) en formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) y las muestra en cortes axiales, coronales y sagitales. En este paso, se visualiza el órgano a fabricar, de ahí se hace la segmentación en la región objetivo o vecindad donde es posible aislar estructuras anatómicas no funcionales como tumores, órganos, huesos, tal como se muestra en las diferentes vistas de la cavidad torácica de la Figura 2 extraída del sitio web embodi3D, una página que ofrece imágenes biomédicas de acceso abierto (AA).

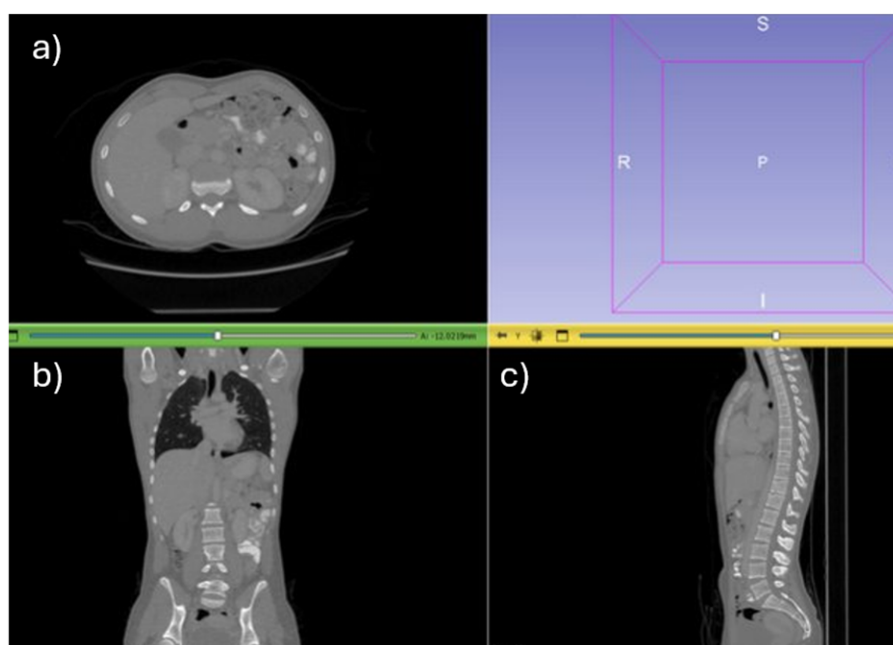


Figura 2: Vistas a) superior, b) frontal y c) lateral de la cavidad torácica en 3D Slicer (AA).

Después, se reconstruye el modelo anatómico, es decir convierte las imágenes planas en modelos tridimensionales manipulables, donde es posible medir su volumen, dimensiones, densidades para finalmente exportarlo como un archivo STL u OBJ para ser utilizado en cualquier software CAD (Computer Aided Design) como SolidWorks®, Fusion® o directamente en uno de impresión 3D como Creality® o Ultimaker Cura®, por ejemplo.

Impresión 3D de moldes y/o modelos

Una vez obtenido el modelo digitalizado del órgano, se continúa con la Manufactura Aditiva por medio de impresión 3D, ya que esta técnica permite crear piezas de cualquier modelo sin importar su morfología, particularmente los órganos humanos que se caracterizan por ser geometrías complejas.

La impresión 3D facilita la obtención de prototipos rápidamente debido a su proceso laminar capa a capa, donde la pieza se va formando gradualmente desde la base hasta la parte superior. Además, existe una disponibilidad y diversificación de sistemas de impresión 3D, por lo que sus costos son factibles para la manufactura de pequeños prototipos y/o a escala.

Dentro de los filamentos para impresión 3D se destaca el TPU (Poliuretano Termoplástico) con durezas de 95A u 85A, siendo este el más flexible, pero difícil de caracterizar sus parámetros de impresión; el PLA (ácido poliláctico) que se caracteriza por su facilidad de impresión para prototipos rápidos, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol) ofrecen mayor resistencia y durabilidad pero su costo es mayor. La Tabla 2 muestra las características de los materiales de impresión comúnmente utilizados para una altura de 0.2 mm entre capas.

Tabla 2: Propiedades de los filamentos para impresión 3D

Filamento	$T_{extrusivn}$	Velocidad (m/s)	T_{cama}	RA
Hyper PLA	220°C	300	45°C	Alta
PLA	230°C	200	45°C	Media
PETG	250°C	120	80°C	Alta
ABS	260°C	120	110°C	Alta
TPU	230°C	50	60°C	Flexible

Actualmente, existe una versatilidad en impresoras 3D que cuentan con su propio software, por ejemplo, (Creality®, Cura®) donde es necesario definir las siguientes propiedades de la impresión: velocidad, temperatura T , de la boquilla y del plato o cama, altura de capa, posicionamiento de la pieza, o si requiere de soportes, relleno para la impresión, el tipo de material, espesor. La Figura 3 muestra la segmentación del intestino y de la parte interna del riñón con sus principales conductos dentro de la interfaz del software de Creality®, incluyendo sus soportes para ser impresos.

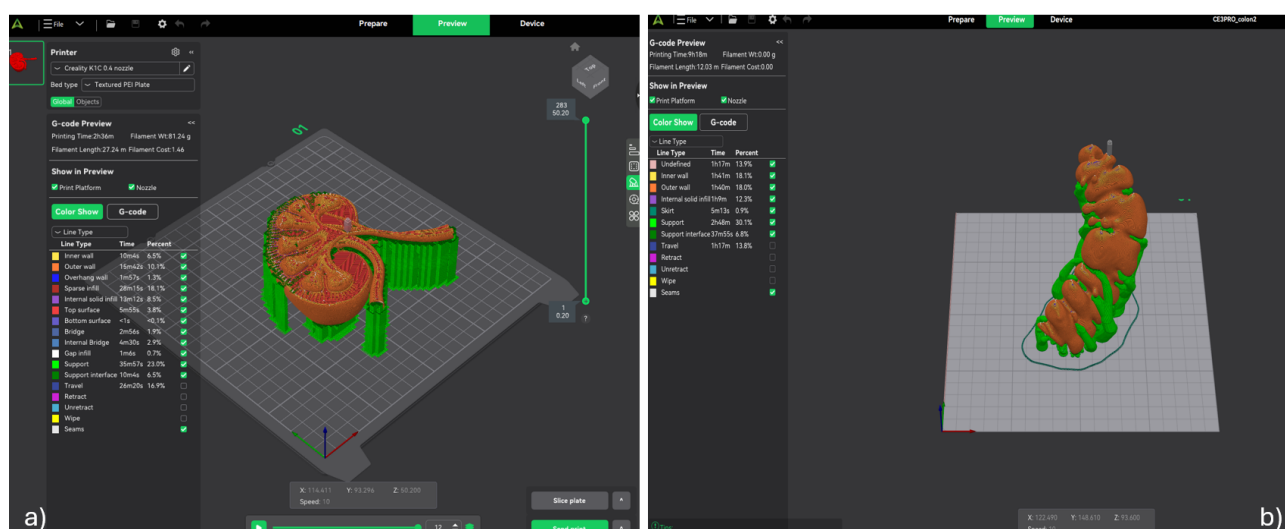


Figura 3: Vista isométrica del a) riñón y del b) intestino laminado en Creality®.

Fabricación artesanal de los órganos

Durante el proceso de impresión, las piezas pueden resultar con impurezas o deformaciones debido a la naturaleza del material, errores de la máquina durante la impresión o no tener las propiedades mecánicas requeridas. Por lo tanto, esta investigación incluye la fabricación artesanal, al ser de gran ayuda en el prototipado de geometrías complicadas. Esta técnica consiste que una vez impresos los modelos con las dimensiones y anatomía de dicho órgano se elaboran moldes artesanales particionados de silicón para que registren la forma anatómica. El proceso artesanal consiste en tres etapas básicas: primero, el modelado artesanal del prototipo a reproducir; segundo, elaboración de molde del material compatible al modelo; tercero, realizar el vaciado o pieza final de dicho molde con cualquier material deseado, por ejemplo, silicón para obtener las mismas propiedades mecánicas.

En este caso la pieza es impresa en 3D, entonces se inicia con elaborar el molde. Al tener una pieza orgánica y curva, se monta una cama y taclel de plastilina alrededor de la pieza para evitar que se mueva al estar manipulando la pieza durante el vertido de silicón en el molde; el área del taclel debe ser plana con un ancho de 3 cm para sostener el molde ahogado o corazón, dicho taclel estará en posición horizontal exactamente a la mitad de la forma de todo el elemento para obtener una parte A. Este paso se realiza en la mitad de la pieza, pero también en la otra mitad, parte B, para obtener el registro de ambos lados completos. El molde estará elaborado en dos partes A y B para que estando abierto se pueda introducir un molde ahogado o corazón como se muestra en la Figura 4.

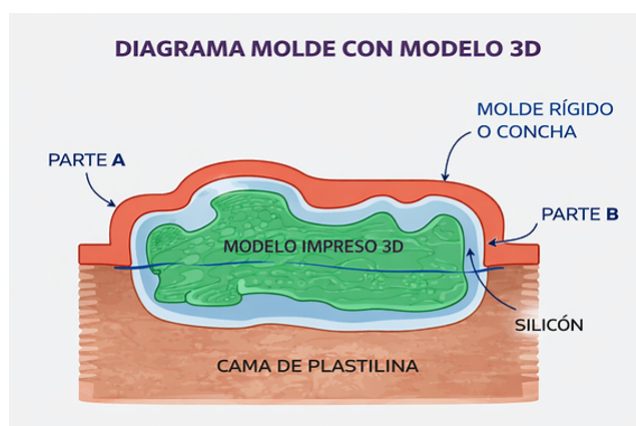


Figura 4: Diagrama de registro del molde-modelo en plastilina.

Posteriormente, se prepara el silicón con su catalizador y se vierte el silicón que es líquido espeso sobre la pieza cubriendo por completo el modelo y una parte del taclel que está en horizontal, y cuidar hasta que vulcanice el material; dando como resultado un molde flexible que permite la salida de una pieza compleja sin que quede atorado en el interior del molde. Este molde de silicón llevará un contra molde o concha rígida que permite la manipulación durante el vaciado del contenido. El material de la concha externa puede ser también de material rígido en un proceso artesanal. Después, se prepara una capa de plastilina (que no contenga sulfuros) de 5mm de grosor que se introduce al interior del molde abierto, debe estar dicha capa en cualquier parte con el mismo grosor uniforme. Finalmente, se rellena con resina poliéster para fabricar el corazón, dicha pieza se va a sostener del taclel rígido del

molde o concha rígida por medio de arcos del mismo material, uniendo el corazón y al área del tacel con su respectiva entrada de aire, como se observa en la Figura 5.

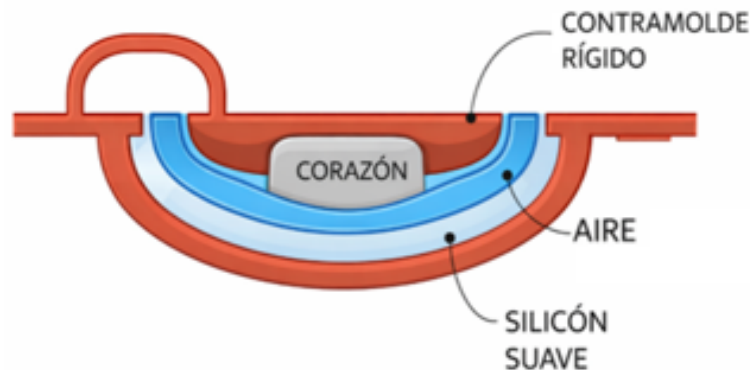


Figura 5: Diagrama de vaciado de silicón en el molde.

Una vez terminado el molde A y B se procede a vaciar. Se rellena el espacio de aire de 5 mm con silicón Ecoflex 00-30 Smooth-on®, el cual se caracteriza por su elasticidad, transparencia y baja viscosidad, en este proceso se vierte en estado líquido una mezcla de 1A:1B durante 3 minutos, después es introducida a una cámara de presión a 20 kPa por 60 s para expulsar el aire que tenga dicho silicón y se deja reposar hasta que cure en un tiempo de 40 minutos a temperatura ambiente aproximadamente 23°C. Ya que la pieza se cura se pega a una pared rectangular del mismo silicón con un espesor 5 mm. Finalmente se procede a cerrar la pieza uniendo A y B con pegamento especial de silicón Sil-Poxy también de la marca Smooth-On®. Por lo tanto, la selección del silicón se hace dependiendo de la dureza deseada.

3. Resultados

Esta sección presenta los resultados preliminares de la metodología aplicada a la fabricación de los modelos anatómicos del riñón y del intestino grueso para ser utilizados en entrenamientos quirúrgicos con robots, describiendo así cada una de sus etapas.

Criterios de diseño

Los criterios de diseño del riñón y del intestino se establecieron con base en su anatomía, funcionamiento y propiedades fisiológicas definidas previamente (ver Tabla 1). Su fabricación se requiere para ser empleados en el entrenamiento de cirugías mínimamente invasivas con robots, por ejemplo, con el Da Vinci para la resección de tumores donde es posible realizar cortes precisos; b) procedimientos donde el robot facilita suturas en zonas profundas; c) reconstrucción y uniones de segmentos y cierre. Por lo que es necesario, los especialistas deben demostrar sus habilidades quirúrgicas en el manejo del robot.

El intestino se caracteriza por formar unas cámaras elipsoidales que se inflan y desinflan secuencialmente, las cuales están determinadas por el radio de la esfera a , altura b , longitud del cilindro conector L entre cámaras, altura del cilindro conector c y número de cámaras o

esferas n , como se observa en la Figura 6. Mientras, que el riñón tiene una geometría característica en forma de frijol.

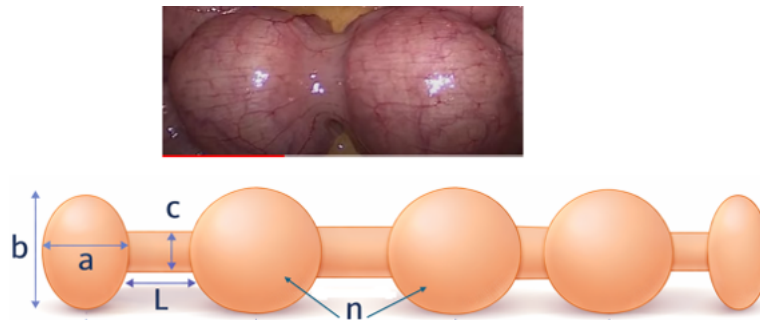


Figura 6: Movimiento de contracción y relajación del intestino.

Procesamiento de imágenes e impresión 3D

Los modelos computacionales del intestino y del riñón se obtuvieron del sitio web embodi3D®, que proporciona archivos de Acceso Abierto. Después, se utilizó 3D Slicer® para la segmentación de sus modelos orgánicos, haciéndole un corte transversal al riñón con sus principales conductos. Después, se generaron los archivos STL para posteriormente exportarlos al software de Creality® (ver Figura 3) en una impresora K1 pro Creality® usando PLA con los parámetros definidos en la Tabla 2. La Figura 7 muestra la digitalización del intestino y los productos 3D obtenidos mostrando en el riñón sus nefronas, corteza y conductos ya impresos en 3D a escala real.



Figura 7: Movimiento de contracción y relajación del intestino.

Fabricación de modelos de silicón

Posteriormente se quitan los soportes agregados a los modelos 3D y dependiendo de la calidad de la impresión se le da un acabado fino con pasta automotriz para eliminar las imperfecciones. Para el caso del vaciado del intestino de PLA se le aplicó silicón Brush-on 35 Smooth On®, solución ideal para aplicaciones en verticales sin escurrimientos, el cual está compuesto por una parte A (base) y una parte B activo (catalizador) que se mezclan 1:1 con un tiempo de curado (pot life) de 20 minutos a una temperatura de 23 °C. Después, se montó

a una base vertical donde se aplicaron múltiples capas, hasta obtener un volumen 14 cm x 2cm x 2cm. Finalmente se expulsó el modelo impreso del silicón gracias a la flexibilidad del material y se obtuvo un modelo físico inflable de 20 gr, como se muestra en las Figura 8.

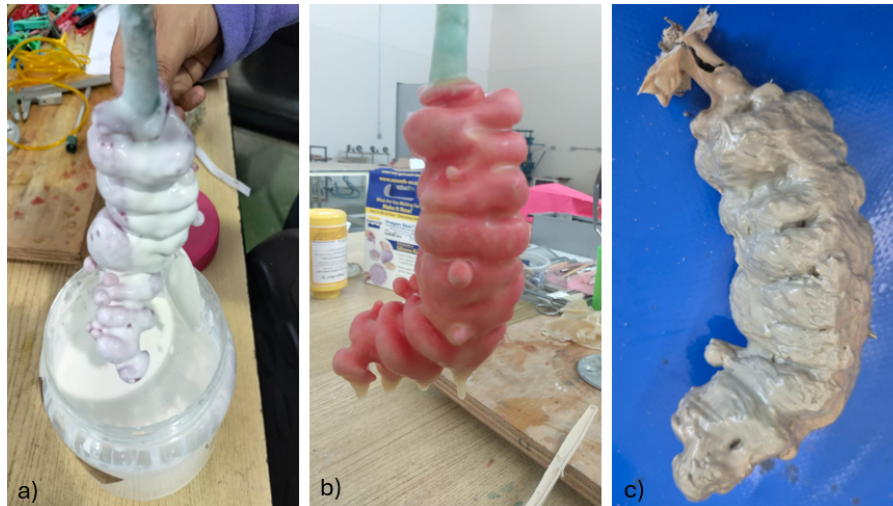


Figura 8: Movimiento de contracción y relajación del intestino.

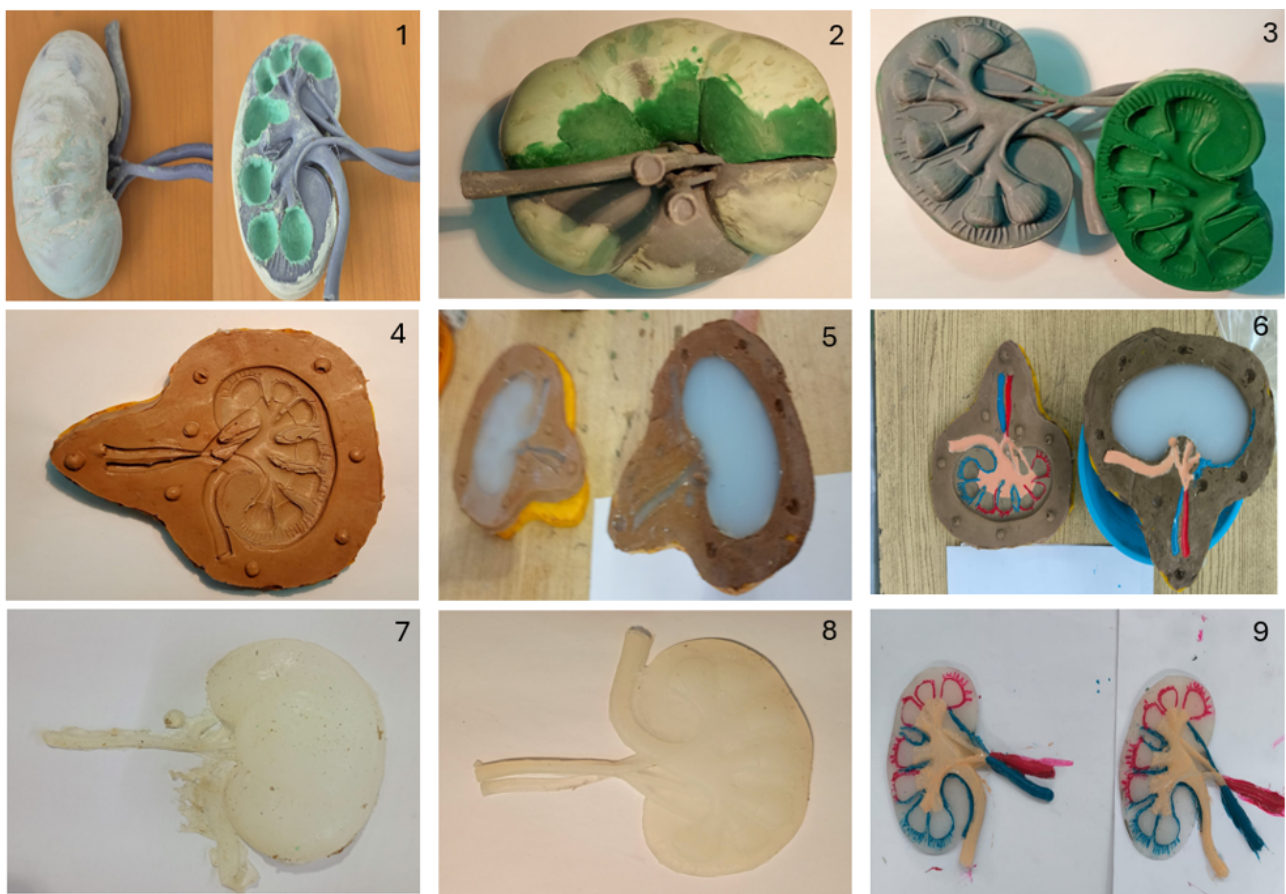


Figura 9: Movimiento de contracción y relajación del intestino.

Por otro lado, el proceso de fabricación del riñón se hizo de diferente manera, al constar de dos partes A y B, por lo que primero se hizo el desbaste y pulido con pasta automotiva epóxica para modelar la parte interna y externa para obtener un riñón completamente cerrado. Después, se fabricó una placa de plasticera (60 % de plastilina y 40 % de cera de abeja) y se aplicó calor en la placa plástica hasta lograr la unión de A con B para registrar la forma como en un sello.

Una vez terminado el modelo, se fabricó el molde de silicón. El molde lleva un tacel y llaves para que el molde al ser de dos partes no se mueva en algún procedimiento. Nuevamente, se utilizó Brush On 35 para fabricar el molde, una vez vulcanizado se aplicó desmoldante universal en Spray Smooth On® y se preparó la mezcla de silicón EcoFlex 00-10 Smooth On® para el vaciado. Además, se empleó una cámara de presión de vacío a 20-30 kPa durante 60 s para eliminar las burbujas de aire que se forman al mezclarse. Después de 4 horas se obtuvo el riñón en silicón para aplicarle la coloración y darle una apariencia más realista. Este procedimiento consiste en verter el silicón por capas, cada color se deja curar y hasta que un color esté vulcanizado se puede proceder con el siguiente color y así sucesivamente, el resultado final se aprecia en la Figura 9.

La fabricación artesanal ofrece ventajas en términos de accesibilidad, personalización y bajo costo relativo. Sin embargo, presenta limitaciones importantes, principalmente asociadas con mayores tiempos de fabricación, variabilidad entre piezas y baja escalabilidad para producción en serie. Por ello, futuras investigaciones deberán orientarse a la estandarización del proceso, la caracterización mecánica cuantitativa de los materiales utilizados, la validación con especialistas en cirugía robótica y la comparación de desempeño frente a simuladores comerciales o modelos biológicos. Estas líneas de trabajo permitirán fortalecer la aplicabilidad de la metodología propuesta como herramienta de apoyo para la formación médica especializada y para el desarrollo de tecnologías nacionales en simulación quirúrgica robótica.

4. Conclusiones

El desarrollo de robots quirúrgicos constituye un campo de innovación científica y tecnológica de carácter multidisciplinario, en el que convergen la medicina, la robótica, la ingeniería biomédica y el diseño de dispositivos médicos. Sin embargo, el uso seguro y eficiente de estos sistemas requiere que los médicos especialistas reciban entrenamiento especializado y certificación previa a su aplicación en pacientes. En este proceso, los simuladores, modelos anatómicos, órganos artificiales y tejidos sintéticos desempeñan un papel crucial, ya que permiten adquirir habilidades técnicas, mejorar la coordinación mano-ojo, desarrollar sensibilidad táctil indirecta y practicar maniobras quirúrgicas complejas en entornos controlados.

No obstante, los equipos de cirugía robótica de alta especialidad son escasos, costosos y requieren mantenimiento especializado, lo que limita su disponibilidad y, en consecuencia, también restringe el número de cirujanos capacitados y certificados en México. Por ello, resulta necesario desarrollar órganos artificiales que sean capaces de emular su fisiología, anatomía, morfología y propiedades mecánicas similares a las de los órganos naturales, que permitan fortalecer las habilidades quirúrgicas de los especialistas y ampliar las oportuni-

dades de entrenamiento en cirugía robótica mínimamente invasiva.

La metodología propuesta permite el diseño y fabricación de modelos anatómicos de bajo costo para ser utilizados como órganos artificiales durante los entrenamientos de cirugía robótica de médicos especialistas, los cuales cumplen con los requerimientos anatómicos necesarios para adquirir sensibilidad táctil, control, realizar procedimientos de suturas, cortes precisos durante la operación con los brazos robóticos. Los modelos físicos artificiales presentados replican la arquitectura tridimensional compleja del riñón e intestino humano para que ayuden a desarrollar habilidades de precisión, coordinación y toma de decisiones en procedimientos mínimamente invasivos, como en la nefrectomía o laparoscopia, respectivamente.

La contribución central de este trabajo radica en la integración de la impresión 3D con un proceso posterior de fabricación artesanal a escala 1:1 que permitió reproducir formas complejas con fidelidad geométrica, orientado a obtener órganos artificiales con propiedades mecánicas aproximadas a las de los órganos naturales, particularmente en términos de flexibilidad, deformabilidad y módulo de elasticidad. Para ello, se emplearon materiales flexibles, como siliconas y elastómeros, capaces de reproducir geometrías anatómicas complejas y permitir una manipulación adecuada durante prácticas quirúrgicas asistidas por robot. Asimismo, la incorporación de elementos funcionales, como cámaras de aire permiten transformar algunos modelos en estructuras no solo anatómicas, sino también dinámicas, con mayor potencial para simular condiciones de manipulación quirúrgica.

En conjunto, el procedimiento propuesto evidencia la importancia de la precisión geométrica, la selección adecuada de materiales y la correcta secuencia de fabricación para obtener órganos artificiales fieles, manipulables y funcionales. La fabricación artesanal con silicón representa una alternativa viable para el desarrollo de prototipos anatómicos personalizados, especialmente en etapas tempranas de investigación, validación y entrenamiento. Además, esta metodología puede adaptarse al desarrollo de otros órganos, maniquíes o piezas con morfologías irregulares, de acuerdo con las necesidades específicas de simulación médica.

Direcciones de correo de los autores

DÁVILA-VILCHIS, J. M. : Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México

mdavilav@uaemex.mx

ZÚÑIGA AVILÉS, L. A.*: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México

lazunigaa@uaemex.mx

RAMÍREZ-GARCÍA, N. G.: Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México

gngarcia@uaemex.mx

VILCHIS-GONZÁLEZ, A. H. : Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, México

avilchisg@uaemex.mx

Referencias

- [1] W. Rosell Puig, B. González Fano, C. Cué Mourellos y C. Dovale Borjas, «Organización de los sistemas orgánicos del cuerpo humano para facilitar su estudio,» *Educación Médica Superior*, vol. 18, n.º 3, págs. 1-1, 2004.
- [2] R. DeSalle e I. Tattersall, «El cerebro,» *Big bangs, comportamientos y creencias. Barcelona, Galaxia Gutenberg*, 2017.
- [3] R. F. Ventura, D. N. Navarro, J. Otero e I. Almendros, «Pulmones biofabricados: un desafío y una oportunidad,» *Archivos de bronconeumología: Organó oficial de la Sociedad Española de Neumología y Cirugía Torácica SEPAR y la Asociación Latinoamericana de Tórax (ALAT)*, vol. 54, n.º 1, págs. 31-38, 2018.
- [4] Z. Ahmed et al., «Liver function tests in identifying patients with liver disease,» *Clinical and experimental gastroenterology*, págs. 301-307, 2018.
- [5] M. Israelsen, S. Francque, E. A. Tsochatzis y A. Krag, «Steatotic liver disease,» *The Lancet*, vol. 404, n.º 10464, págs. 1761-1778, 2024.
- [6] W. Otero R y F. Sierra A, «El hígado en cirugía,» *Revista colombiana de Gastroenterología*, vol. 18, págs. 230-238, 2003.
- [7] N. Özkaya, D. Leger, D. Goldsheyder y M. Nordin, «Mechanical properties of biological tissues,» en *Fundamentals of biomechanics: equilibrium, motion, and deformation*, Springer, 2016, págs. 361-387.
- [8] C. N. de Trasplantes, «Estadísticas sobre donación y trasplantes. Secretaría de Salud, Gobierno de México,» 2026. dirección: <https://www.gob.mx/cenatra/documentos/estadisticas-50060>
- [9] A. E. Pereira Cuns, «Revisión bibliográfica: Fabricación de órganos artificiales,» 2022.
- [10] J. E. M. Díaz, «Tecnologías disruptivas como alternativa a la obtención de órganos y tejidos artificiales,» *Revista Colombiana de Bioética*, vol. 15, n.º 1, 2020.
- [11] C. Mandrycky, Z. Wang, K. Kim y D.-H. Kim, «3D bioprinting for engineering complex tissues,» *Biotechnology advances*, vol. 34, n.º 4, págs. 422-434, 2016.
- [12] F. Iqbal et al., «Continuum and soft robots in minimally invasive surgery: A systematic review,» *IEEE Access*, vol. 13, págs. 24 053-24 079, 2025.
- [13] D. T. Vu et al., «Soft Robotics and Advanced Technologies for Minimally Invasive Bioprinting: The Future of Internal Organ Repair,» *Advanced Science*, vol. 13, n.º 22, e23532, 2026.
- [14] F. M. León Martínez, P. A. Benenaula Cuzco, P. J. Encalada Loayza y K. E. León Sagbay, «Robotic surgery: a look into the future of surgical intervention,» *Horizonte sanitario*, vol. 24, n.º 2, págs. 346-362, 2025.
- [15] K. Qiu et al., «3D printed organ models with physical properties of tissue and integrated sensors,» *Advanced materials technologies*, vol. 3, n.º 3, pág. 1 700 235, 2018.
- [16] Z. Jin et al., «3D printing of physical organ models: recent developments and challenges,» *Advanced Science*, vol. 8, n.º 17, pág. 2 101 394, 2021.

- [17] J. S. S. Matute, A. E. M. Meza, D. C. Sánchez, D. T. Puentes y S. C. C. Montero, «Avances en la cirugía robótica, una revisión sistemática enfocada en Cirugía General,» *Scientific & Education Medical Journal:(SEMJ)*, vol. 2, n.º 2, págs. 59-70, 2022.
- [18] E. G. Rodríguez, N. C. Sánchez, C. López-Casado e I. R. Blanco, «Consola de teleoperación de realidad mixta para sistemas quirúrgicos robóticos,» *Jornadas de Automática*, n.º 46, 2025.
- [19] L. Bianchi, F. Cavarzan, L. Ciampitti, M. Cremonesi, F. Grilli y P. Saccomandi, «Thermophysical and mechanical properties of biological tissues as a function of temperature: a systematic literature review,» *International Journal of Hyperthermia*, vol. 39, n.º 1, págs. 297-340, 2022.