

Modelo de impresión 3D para planificación quirúrgica en trasplante hepático con donante vivo adulto-adulto

Brenda Andrea Gamez del M.¹, Carlos Montoya M.¹, Luis Felipe Puelma C.¹, Erwin G. Buckel G.¹, Erwin Buckel Sch.¹ y Nicolás Jarufe C.¹

¹Clinica Las Condes. Santiago, Chile.

Recepción 2021-05-25,
aceptado 2021-07-27

Correspondencia a:

Dra. Brenda Andrea
Gamez del M.
bagamez@miuandes.cl

Three-dimensional printing of a liver model for surgical planning in adult-to-adult living donor liver transplantation

The last ten years, thanks to the great advances in technology, three-dimensional (3D) printing has become an accessible, useful, and innovative tool for different areas of medicine. These include surgical planning, implant and prosthetic creation, medical education, and even doctor-patient communication. Regarding surgical planning, 3D printing takes on special relevance in highly complex surgeries. In the case of living donor liver transplantation where it is a priority to guarantee maximum safety for the donor, as well as the best quality of the graft for the recipient, surgical planning is mandatory. Regarding this, 3D printing of an anatomically comparable liver model of the donor, gives the surgeon the possibility of obtaining a clearer, more direct, and tangible image, from any angle of the organ, than a traditional virtual image. In this manner, the surgeon has an additional tool to plan the best surgical approach, anticipate anatomical variations and even, when the impression material allows it, to practice the procedure. Transplant center of Clinica las Condes, together with Innovation laboratory worked together on the 3D printing process liver models used for surgical planning of the first two liver transplants with an adult-adult laparoscopic living donor. The objective of this work is to describe the 3D printing process and analyze the difficulties and benefits of the process and its results.

Keywords: 3D printing, surgical planning; living donor; liver transplantation.

Resumen

Gracias a los grandes avances de la tecnología, los últimos diez años, la impresión en tres dimensiones (3D) se ha convertido en una herramienta accesible, útil e innovadora para distintas áreas de la medicina. Entre ellas planificación quirúrgica, creación de implantes y prótesis, educación médica e incluso comunicación médico-paciente. Con respecto a planificación quirúrgica, la impresión 3D cobra especial relevancia en cirugías de alta complejidad. En el caso del trasplante hepático con donante vivo, donde es prioritario garantizar la máxima seguridad para el donante, al mismo tiempo que la mejor calidad del injerto para el receptor, la planificación quirúrgica es mandatoria. En este aspecto, la impresión 3D de un modelo de hígado, anatómicamente comparable al del donante, entrega al cirujano la posibilidad de obtener una imagen más clara, directa y tangible, desde cualquier ángulo del órgano, que una imagen virtual tradicional. De esta forma, el cirujano tiene a su alcance una herramienta adicional para plantear el mejor abordaje quirúrgico, anticipar variaciones anatómicas e incluso, cuando el material de impresión lo permite, practicar el procedimiento. En Clínica Las Condes, el centro de trasplante junto al Centro de Innovación, trabajaron en conjunto en la impresión 3D de dos modelos de hígado, utilizados para la planificación quirúrgica de los primeros dos trasplantes hepáticos con donante vivo adulto-adulto realizados en Latinoamérica, donde la hepatectomía del donante se realizó de manera totalmente laparoscópica. El objetivo de este trabajo es describir el proceso de impresión 3D y analizar las dificultades y beneficios del proceso y sus resultados.

Palabras clave: impresión 3D; planificación quirúrgica; donante vivo; trasplante de hígado.

Introducción

La impresión 3D es un proceso mediante el cual es posible crear un objeto tridimensional utilizando la superposición sucesiva de capas de un material determinado¹. Actualmente, su utilidad abarca amplias áreas de la ciencia y tecnología. En el ámbito de la medicina, es cada vez más utilizada para planificación quirúrgica, creación de implantes y prótesis, educación médica, mejorar la comunicación médico-paciente e incluso, cuando el material de impresión lo permite, practicar procedimientos².

Para la planificación quirúrgica, la impresión 3D de órganos anatómicamente comparables al original, permite a los cirujanos obtener una imagen clara, directa y tangible desde cualquier ángulo del órgano en estudio. Lo anterior es de gran relevancia, sobre todo en cirugías de alta complejidad, donde una detallada planificación, puede ser un factor determinante tanto del éxito de la cirugía como de la evolución del paciente³.

En relación con el trasplante hepático, el aumento en las listas de espera, asociado a la baja tasa de donación cadavérica⁴, han incentivado el desarrollo de la técnica del trasplante hepático donante vivo (THDV). En los receptores pediátricos, el THDV es una técnica realizada de rutina en varios centros especializados e incluso, según el último consenso de expertos, el realizarlo laparoscópico debería ser considerado como la técnica estándar para la cirugía del donante⁵⁻⁷. Contrario a lo anterior, el trasplante hepático donante vivo adulto-adulto (THDVA-A) es realizado por pocos centros. El factor determinante se debe, al mayor volumen hepático requerido por un receptor adulto, y a la gran complejidad que significa someter un paciente sano a una hepatectomía completa de lóbulo derecho o izquierdo⁸.

Además, en el THDV la necesidad de garantizar la máxima seguridad para el donante es mandatoria y, por ende, el uso de la impresión 3D es una herramienta útil para anticipar los posibles obstáculos que pudieran presentarse durante la cirugía, principalmente con relación a variaciones anatómicas de estructuras vasculares y/o vía biliar. El objetivo del presente trabajo es describir el proceso de impresión 3D utilizado en nuestro centro para la planificación quirúrgica de los dos primeros THDVA-A realizados en Latinoamérica, donde la cirugía del donante se hizo de manera completamente laparoscópica.

Materiales y Método

El proceso de planificación quirúrgica para el THDVA-A se realizó en conjunto con el Centro

de Innovación de Clínica Las Condes el cual tiene una experiencia de 5 años en el procesamiento de imágenes médicas, modelamiento anatómico 3D e impresión 3D de estos modelos. El Centro de Innovación ha apoyado por más de 4 años en diferentes cirugías complejas, en su mayoría traumatológicas, y en particular en 13 cirugías hepáticas.

Consideraciones éticas

El presente trabajo cuenta con el consentimiento informado de cada paciente y con la aprobación y constancia del Comité de Ética de Clínica Las Condes.

Pacientes

Se estudiaron prospectivamente a dos pacientes consecutivos (2 donantes y 2 receptores) que fueron evaluados y aprobados por un equipo multidisciplinario para THDVA-A. A los donantes y receptores se les realizaron evaluaciones preoperatorias estandarizadas, las cuales incluyeron: exámenes de laboratorio, evaluación psiquiátrica, estudio con imágenes; angiografía con tomografía computarizada (Angio-TC) de abdomen y colangiografía resonancia. Estas imágenes fueron utilizadas para evaluar características anatómicas hepáticas y para realizar los cálculos volumétricos pretrasplante a donantes y receptores.

Proceso de impresión 3D

Este proceso es realizado por el ingeniero del Centro de Innovación de Clínica Las Condes. El primer proceso que realiza para la construcción del modelo 3D consiste en la segmentación de imágenes obtenidas a partir del Angio-TC de abdomen. La segmentación es un proceso que consiste en la identificación y marcado de las zonas de interés. Este proceso se realizó para identificar las diferentes estructuras anatómicas del hígado (arterias, venas y parénquima hepático), utilizando Slicer3D 4.10 (<https://www.slicer.org/>).

Una vez terminada la segmentación y validado el proceso por el cirujano, es decir, confirmando que los elementos anatómicos seleccionados fueran correctos, la segmentación de cada uno de los elementos del hígado son exportadas por separado en formato .obj (formato de modelos 3D), las cuales son importadas en 3DsMax (*software* de creación de gráficos y animación 3D desarrollado por Autodesk) para el proceso de mallado y unión de los diferentes modelos 3D.

El nuevo modelo virtual de hígado tiene la ventaja de poder ser editado en tiempo real, es decir, la creación del archivo .obj permite que el modelo

sea manipulable gracias a su estructura basado en polígonos. En la Figura 1 se puede observar que el parénquima hepático tiene un grado de transparencia, propiedad que le otorga el programa 3DsMax. Gracias a esta función, es posible la visualización en una misma imagen, de zonas intrahepáticas específicas, además de cálculo de métricas importantes para la planificación quirúrgica, como volumen hepático y distancias entre vasos.

Cuando se analiza un órgano sólido como el hígado, las zonas de interés a evaluar, tales como vasos sanguíneos y vía biliar, están ocultas por el parénquima hepático, por lo tanto, virtualmente son visibles sólo al darle transparencia al parénquima, pero físicamente son imposibles de visualizar. Por esta razón, se propone la utilización del módulo modelGridMaker (<https://github.com/carlangasmontoya/modelGridMaker>), creado en el Centro de Inno-

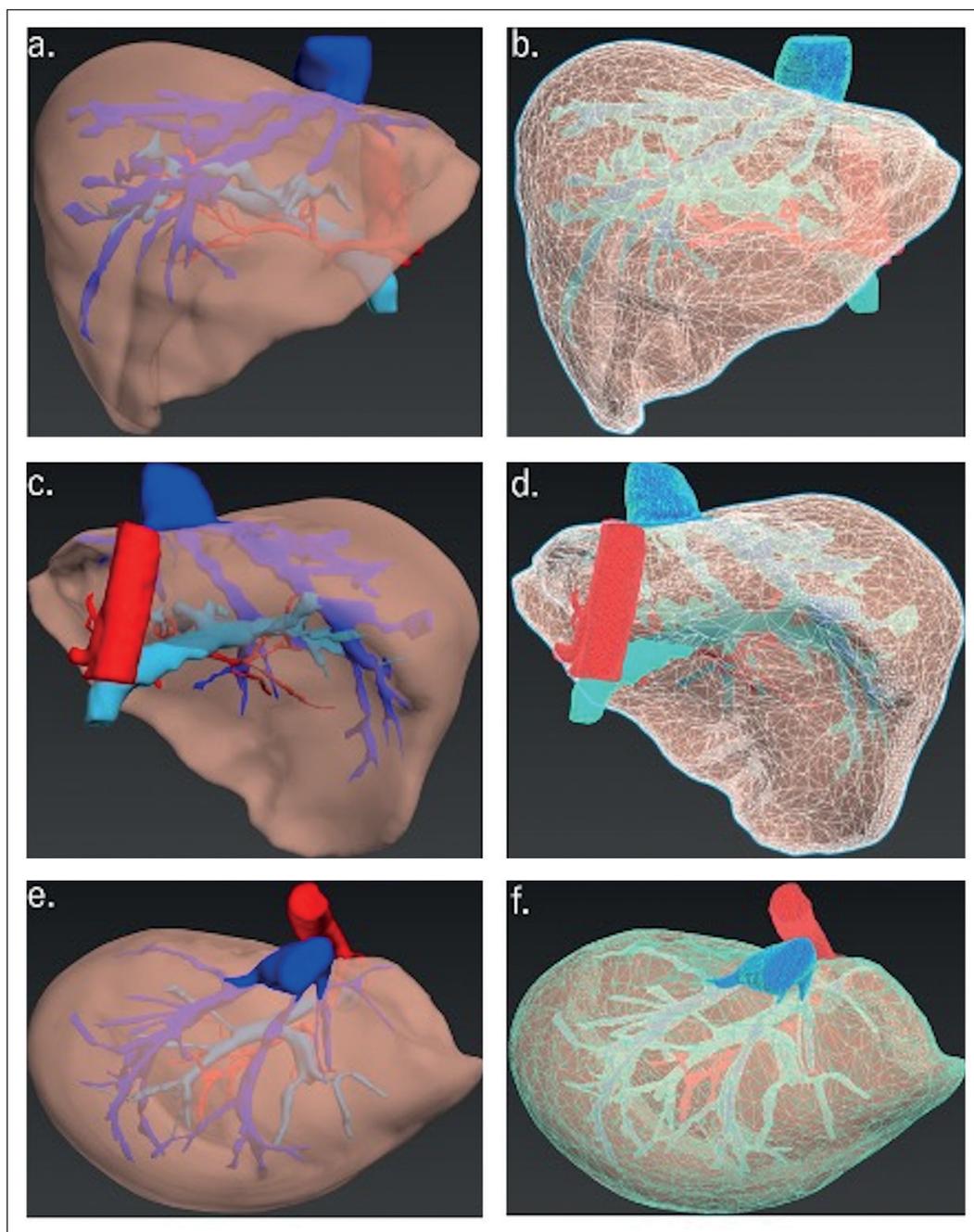


Figura 1. Modelo 3D resultado del procesamiento de imágenes. En la Figura 1 (a), (c) y (e) se visualiza la superficie del hígado con cierta opacidad, pero permitiendo observar los vasos y estructuras internas. En la Figura 1 (b), (d), y (f) se observan los polígonos que constituyen el modelo 3D.

vacación de Clínica Las Condes. Este módulo escrito en MAXScript (lenguaje de alto nivel orientado a objetos integrado en 3DsMax) realiza la creación de un enrejado que reemplaza el parénquima hepático y rodea toda la superficie del hígado (Figura 2).

Este nuevo modelo, ahora tiene la característica de ser imprimible, manteniendo la morfología del volumen hepático y permitiendo la visualización de los diferentes elementos internos que componen el hígado. Además, es posible realizar mediciones entre los diferentes elementos en tiempo real. Esto es posible debido a que en el proceso de construcción del enrejado por medio de *modelGridMaker*, se van creando curvas de nivel por 3 planos perpendiculares, con una distancia de 10 mm entre cada curva (Figura 3).

Finalmente, el modelo creado es exportado en formato .stl a *Preform* (<https://formlabs.com/latam/software/>) en donde se realiza la configuración previa a la impresión. Este programa se encarga de ajustar los parámetros de impresión y de enviar el trabajo a la máquina de impresión 3D *Formlabs2* de *Formlabs* (<https://formlabs.com/>) utilizando el material “*Surgical Guide*” (<https://formlabs.com/store/surgical-guide-resin/>) para el primer caso y “*White Resin*” para el segundo, ambos de *Formlabs* (<https://formlabs.com/store/white-resin/>).

El proceso de impresión para cada uno de los dos modelos tuvo una duración de 12 h, un proceso de lavado de 15 minutos (con alcohol isopropílico) y un proceso de curado con luz ultravioleta de 30 minutos. La impresión del parénquima hepático (enrejado) se realizó por partes debido a que la bandeja (*build platform*, en inglés) de la máquina es de menor tamaño que el total del enrejado. Una

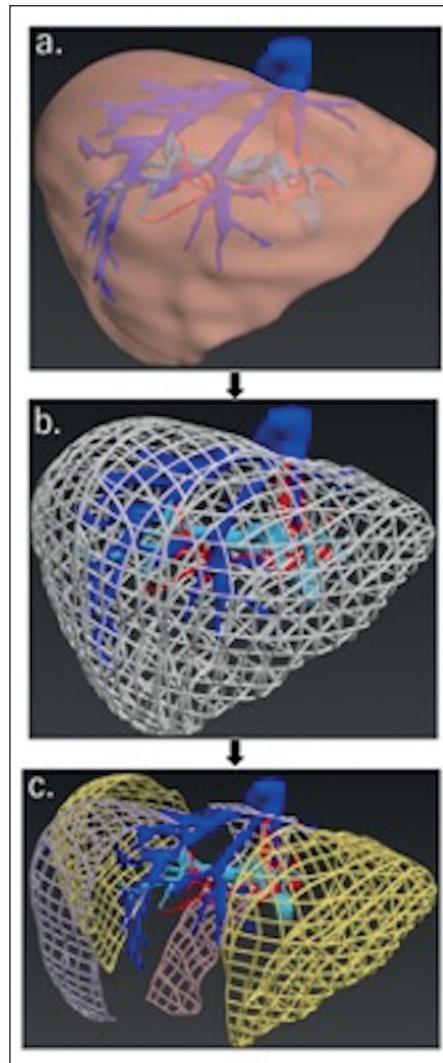


Figura 2. Construcción de la grilla por medio del módulo *Model Grid Maker* que mantiene la morfología de la superficie hepática y permite la visualización interna en el modelo impreso.

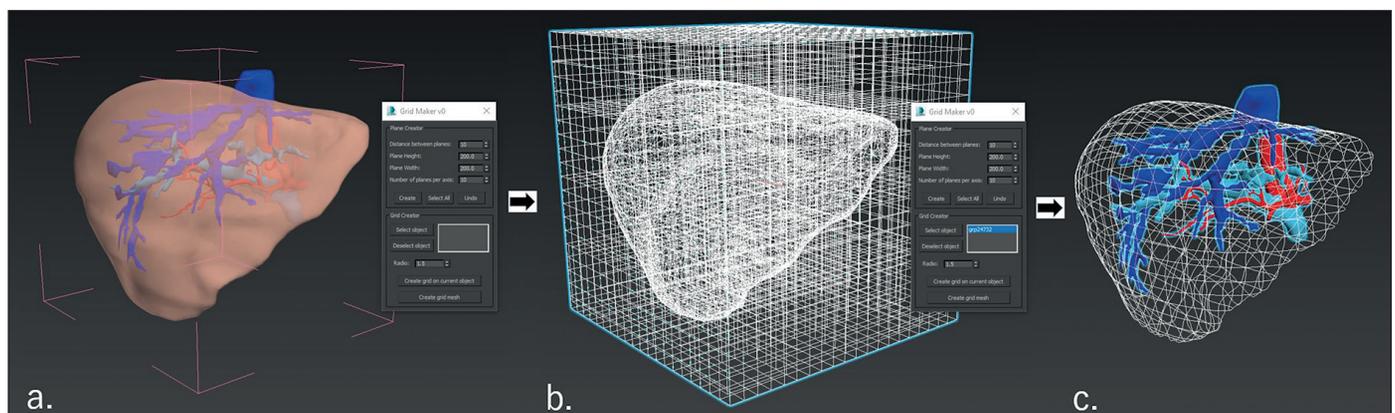


Figura 3. Proceso de modelado de la grilla por medio del módulo *Model Grid Maker*. Realizando este proceso, el modelo pasa de tener una superficie sólida (a) a tener una morfología basada en una grilla (c). En (b) se observa el proceso de construcción de las curvas de nivel a través de la superficie del modelo.

vez impresas las diferentes partes del modelo, estas fueron pintadas para diferenciarlas unas de otras y, posteriormente, unidas manualmente para armar el modelo completo.

Resultados

Caso 1

El primer caso corresponde a un hombre de 28 años con diagnóstico de colangitis esclerosante, secundaria a isquemia posparo cardiocirculatorio. El puntaje MELD Na⁺ pretrasplante del receptor era de 11 puntos, MELD operacional de 20 puntos y un Child-Pugh A.

La donante fue su hermana, una mujer sana de 30 años. El volumen hepático total de la paciente, calculado mediante evaluación volumétrica por Angio-TC de abdomen, era de 1.954 mL y el lóbulo derecho (segmentos V, VI, VII y VIII) era de 924 mL sin la vena hepática media (VHM). El volumen hepático residual, es decir, posterior a la hepatectomía de lóbulo derecho fue de 666 mL, que equivale al 41,8% del volumen total del hígado de la donante.

El índice peso del injerto/peso del receptor fue de 1,45 (GW/RW ratio, en inglés). Las ramas afluentes de los segmentos V y VIII a la VHM eran < 5 mm. La anatomía de la arteria hepática y vena porta eran normales. La vía biliar se estudió de manera independiente con colangiografía, que demostró bifurcación intrahepática de los conductos derecho anterior y posterior, sin otras variantes.

En este modelo se utilizó una técnica propia de *3DsMax* (Figura 5) que permite la creación de una grilla utilizando las aristas de los diferentes polígonos que conforman el volumen del hígado. A diferencia la técnica utilizada con *modelGridMaker*, las aristas de los polígonos poseen 6 grados de libertad. El material utilizado es transparente debido a que se utilizó el material “*Surgical Guide Resin*” de *Formlabs* (Figura 4).

Caso 2

El segundo caso fue una mujer de 57 años con diagnóstico de enfermedad poliquística hepato-renal. El puntaje MELD Na⁺ pretrasplante de la receptora era de 9 puntos, MELD operacional de 15 puntos y un Child-Pugh A.

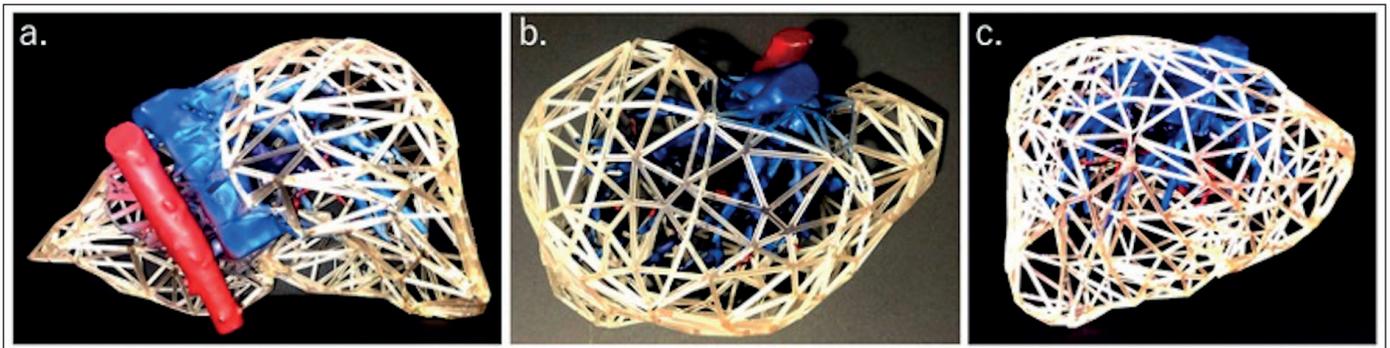


Figura 4. Concepto de grilla basado en la reducción de polígonos del modelo.

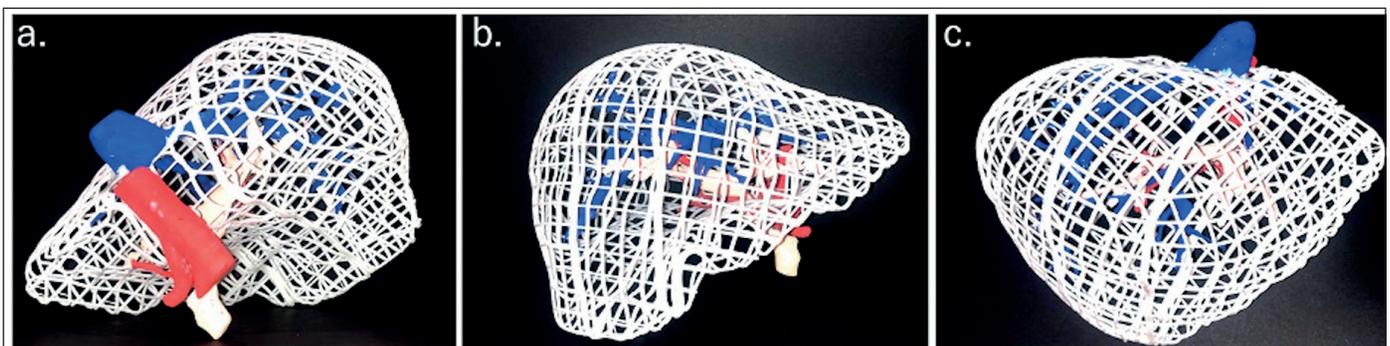


Figura 5. Concepto de grilla basado utilizando *Model Grid Maker*.

El donante fue su hijo, un hombre sano de 28 años. El volumen hepático total del donante, calculado mediante evaluación volumétrica por Angio-TC de abdomen, era de 1.281 mL y el lóbulo derecho (segmentos V, VI, VII y VIII) era de 853 mL sin la vena hepática media (VHM). El volumen hepático residual del donante fue de 428 mL, que equivale al 33,4% del volumen total de su hígado. El índice peso del injerto/peso del receptor fue de 1,78 (*GW/RW ratio*, en inglés). La anatomía de la arteria hepática y vena porta eran normales. La vía biliar se estudió de manera independiente con colangiografía resonancia, que demostró bifurcación intrahepática de los conductos derecho anterior y posterior, sin otras variantes.

El tipo de grillado es resultado del método *modelGridMaker*, explicado anteriormente, y se utilizó el material de impresión “White Resin” de *Formlabs* (Figura 5).

Los hallazgos anatómicos intraoperatorios de los elementos vasculares y bifurcación biliar, coincidieron con la descripción de los exámenes, revalidada por los modelos 3D. Consecuentemente, se mantuvo la planificación preoperatoria, sin necesidad de cambios por hallazgos inesperados. En ambos casos se pudo realizar el procedimiento en forma totalmente laparoscópica con buen funcionamiento de los injertos en los respectivos receptores.

Discusión

En este trabajo, usando la tecnología de impresión 3D, se generaron exitosamente modelos prototipo de hígados humanos basados en las imágenes individuales de TC de abdomen de los pacientes. La impresión de órganos para la planificación quirúrgica es una herramienta valiosa para entender las relaciones espaciales entre las diferentes estructuras vasculares y biliares; así como también, para facilitar la cirugía y, potencialmente, minimizar las complicaciones intraoperatorias. Este es el primer estudio a nivel nacional en reproducir hígados humanos mediante la tecnología de impresión 3D para la planificación quirúrgica de un THDVA-A.

Una de las ventajas de tener un modelo 3D físico durante la cirugía, es que permite simular los cambios de orientación experimentados durante el procedimiento (movilización, retracción del hígado y exposición del hilio hepático). Esto permite la fácil y rápida reorientación e identificación de puntos de referencia anatómicos relevantes durante la cirugía. Lo anterior no se logra de igual manera al mirar una

imagen 3D en una pantalla 2D, donde el verdadero sentido de profundidad está limitado.

Existen varios pasos críticos en la cirugía laparoscópica del donante, siendo la transección del parénquima, uno de los más relevantes. Es durante esta etapa que deben identificarse oportunamente elementos vasculares y biliares de manera de no lesionarlos de forma inadvertida y provocar sangrados o filtraciones biliares. Además de preservar estructuras contralaterales para no comprometer la funcionalidad del hígado remanente. La clave para ello es seguir en todo momento el plano correcto de transección que, en ambos casos del estudio, correspondió a la vena hepática media. Aquí nuevamente cobra importancia el acceso físico a una estructura 3D que puede ser observada y analizada por el equipo quirúrgico las veces que sea necesario para aclarar dudas. El modelo 3D de hígado durante la cirugía, otorgó al cirujano una herramienta útil, siendo un adecuado complemento de orientación espacial.

Uno de los desafíos de este proyecto fue crear la “transparencia” del parénquima hepático de manera de visualizar las estructuras vasculo-biliares interiores. Procedimiento de mayor complejidad a la impresión 3D de otras estructuras sólidas que no requieren descripción del contenido interior como las composiciones óseas, por ejemplo.

Finalmente, y con vistas al futuro de la impresión 3D y su utilidad en la planificación quirúrgica, hoy en día es una tecnología cada vez más accesible, ya que los artefactos capaces de desarrollar estos modelos han reducido sus costos⁹. Además, existe un gran repertorio de materiales de impresión, todos con distintos costos, beneficios y características que se pueden ir adecuando a las necesidades particulares de los modelos que se desean imprimir y el objetivo que se busca con ellos. La impresión 3D es una herramienta complementaria en la planificación de cirugías complejas, que pudiera ser de ayuda a los cirujanos. Sin embargo, existe escasez de estudios que puedan validar de manera objetiva los beneficios de estas herramientas.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Conflictos de interés: no hay.

Bibliografía

1. Gálvez M, Asahi T, Baar A, Carcuro G, Cuchacovich N, Fuentes JA, et al. Use of Three-dimensional Printing in Orthopaedic Surgical Planning. *J Am Acad Orthop Surg Glob Res Rev* [Internet]. 2018 [cited 2021 Feb 23];2(5). Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6132335/>
2. Kuroda S, Kihara T, Akita Y, Kobayashi T, Nikawa H, Ohdan H. Simulation and navigation of living donor hepatectomy using a unique three-dimensional printed liver model with soft and transparent parenchyma. *Surg Today*. 2020;50:307-13. doi: 10.1007/s00595-019-01868-9.
3. Oshiro Y, Ohkohchi N. Three-Dimensional Liver Surgery Simulation: Computer-Assisted Surgical Planning with Three-Dimensional Simulation Software and Three-Dimensional Printing<sup/>. *Tissue Eng Part A*. 2017;23:474-80. doi: 10.1089/ten.TEA.2016.0528.
4. Uribe M, González G, Paravic N. Trasplante Hepático en Chile: Pasado, Presente y Futuro. *Rev Cirugia* 2020;72:482-91. Disponible en: doi: 10.35687/s2452-45492020005821 [Accessed 25 may. 2021].
5. Soubrane O, de Rougemont O, Kim K-H, Samstein B, Mamode N, Boillot O, et al. Laparoscopic Living Donor Left Lateral Sectionectomy: A New Standard Practice for Donor Hepatectomy. *Ann Surg*. 2015;262:757-61; discussion 761-763. doi: 10.1097/SLA.0000000000001485.
6. Broering DC, Elsheikh Y, Shagrani M, Abaalkhail F, Troisi RI. Pure Laparoscopic Living Donor Left Lateral Sectionectomy in Pediatric Transplantation: A Propensity Score Analysis on 220 Consecutive Patients. *Liver Transplant Off Publ Am Assoc Study Liver Dis Int Liver Transplant Soc*. 2018;24:1019-30. doi: 10.1002/lt.25043.
7. Cho H-D, Samstein B, Chaundry S, Kim K-H. Minimally invasive donor hepatectomy, systemic review. *Int J Surg Lond Engl*. 2020;82S:187-91. doi: 10.1016/j.ijssu.2020.06.023.
8. Wakabayashi G, Cherqui D, Geller DA, Buell JF, Kaneko H, Han HS, et al. Recommendations for laparoscopic liver resection: a report from the second international consensus conference held in Morioka. *Ann Surg*. 2015;261:619-29. doi: 10.1097/SLA.0000000000001184.
9. Spencer SR, Kay Watts L. Three-Dimensional Printing in Medical and Allied Health Practice: A Literature Review. *J Med Imaging Radiat Sci*. 2020;51:489-500. doi: 10.1016/j.jmir.2020.06.003.