

Informe final publicable de proyecto

Impacto de la aplicación de biomodelos 3D virtuales, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D en tratamientos quirúrgicos de alta complejidad en la edad pediátrica

Código de proyecto ANII: FSS_X_2022_1_173314

Fecha de cierre de proyecto: 01/01/2025

ZABALA TRAVERS, Silvina (Responsable Técnico - Científico)

GALIANA, Alvaro (Co-Responsable Técnico-Científico)

PARADEDA CHIESA, César Mauricio (Investigador)

RIAÑO REGUEIRA, Vanessa (Investigador)

RUSSI SARRALDE, Martin (Investigador)

SIENRA, Celina (Investigador)

ELIZONDO, Tabaré (Investigador)

ADMINISTRACIÓN DE SERVICIOS DE SALUD DEL ESTADO (Institución Proponente) \\\

ADMINISTRACIÓN DE SERVICIOS DE SALUD DEL ESTADO. CENTRO HOSPITALARIO PEREIRA ROSSELL (Institución Proponente)

\\ UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE MEDICINA \\ UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA. FACULTAD DE MEDICINA

Resumen del proyecto

El proyecto "Impacto de la aplicación de biomodelos 3D virtuales, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D en tratamientos quirúrgicos de alta complejidad en la edad pediátrica", financiado por el FSS ANII 2022, se desarrolló en el Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR) durante el período 2023-2024.

La implementación del proyecto incluyó la adquisición de impresoras 3D FDM y SLA, un escáner de mano de alta resolución, software especializado y laptops para planificación virtual, consolidando la infraestructura del laboratorio.

Hasta el momento, se han recolectado datos de 47 pacientes pediátricos mediante un formulario web completado por el equipo tratante, abarcando especialidades como traumatología reconstructiva, cirugía de columna, cirugía de tórax, odontología, cirugía pediátrica general, cirugía plástica y cirugía maxilofacial.

Los resultados preliminares evidencian un impacto positivo: el 68% de los casos modificaron su estrategia quirúrgica tras el uso de biomodelos 3D, optimizando la toma de decisiones. Además, la seguridad percibida por el equipo mejoró significativamente, con 79.6% de los cirujanos reportando altos niveles de confianza, y el 100% prefiriendo trabajar con herramientas 3D. En el ámbito comunicacional, el uso de biomodelos mejoró la comprensión del procedimiento por parte de las familias ($p=0.034$), fortaleciendo la relación médico-paciente.

A pesar de desafíos como retrasos en la entrega de equipamiento e infraestructura, el proyecto superó las expectativas, ampliando su impacto más allá de lo planificado y generando nuevas colaboraciones en I+D para seguir impulsando la innovación en salud.

Ingeniería y Tecnología / Ingeniería Médica / Ingeniería Médica / Biomodelado, Planificación virtual e Impresión 3D Médica

Palabras clave: Biomodelo 3D / Planificación quirúrgica virtual / Cirugía pediátrica /

Antecedentes, problema de investigación, objetivos y justificación.

Los biomodelos 3D son réplicas virtuales tridimensionales (3D) de un paciente que se obtienen a partir de estudios de imagen como tomografía computada (TC) o resonancia magnética (RM). Representan una nueva forma de visualizar la anatomía y la enfermedad de un paciente, en una modalidad que acelera y optimiza la transferencia de información desde las imágenes médicas, facilitando la comprensión de patologías y mejorando la calidad de la planificación quirúrgica.

Para generar biomodelos 3D se requiere el postprocesamiento de imágenes de TC y/o RM mediante software especializado que selecciona la anatomía de interés de las imágenes médicas y los convierte en archivos en formato 3D (.stl), los cuales pueden visualizarse en pantallas, lentes de realidad virtual o aumentada, o materializarse mediante impresión 3D.

La planificación quirúrgica virtual (PQV) ha sido una de las aplicaciones más innovadoras de esta tecnología. A través de esta técnica, se utilizan los biomodelos 3D para realizar cirugías virtuales y diseñar herramientas quirúrgicas personalizadas al paciente. Esta herramienta permite probar diferentes estrategias quirúrgicas hasta seleccionar aquella con mayores beneficios y menores riesgos para el paciente, tornando los procedimientos más seguros y más rápidos, ya que las decisiones más importantes se toman antes de entrar al block quirúrgico. En algunos casos se diseñan herramientas personalizadas (guías quirúrgicas) con el objetivo de reproducir fielmente dicha planificación virtual durante el

procedimiento en el block quirúrgico, y de esta forma lograr márgenes oncológicos precisos y reducir la necesidad de ajustes intraoperatorios.

En algunos pacientes se realiza la impresión 3D, para contar con un modelo tangible de la anatomía. Dependiendo del material empleado, pueden utilizarse para estudio anatómico, simulación prequirúrgica, guía intraoperatoria o para la fabricación de guías quirúrgicas personalizadas diseñadas durante la PVQ.

En las últimas décadas, la aplicación de tecnologías 3D en el ámbito médico ha experimentado un crecimiento exponencial, transformando la planificación quirúrgica y la fabricación de dispositivos personalizados. En particular, la impresión 3D en el punto de atención o intrahospitalaria (Point-of-Care, PoC) ha sido adoptada en numerosos hospitales para la creación de biomodelos anatómicos, guías quirúrgicas personalizadas e incluso implantes a medida.

Según un estudio reciente realizado en hospitales españoles, se ha identificado un aumento significativo en la implementación de unidades de impresión 3D en el PoC, pasando del 31.5% en 2019-2020 al 41.09% en 2022-2023. Este crecimiento ha estado impulsado por la necesidad de mayor autonomía en la producción de biomodelos y guías quirúrgicas, así como por el impacto de la pandemia de COVID-19, que evidenció la importancia de contar con recursos de fabricación localizados dentro de los hospitales.

Estudios realizados en centros de referencia como el Hospital Sant Joan de Déu (España) y la Clínica Mayo (EEUU) han evidenciado una reducción en los tiempos quirúrgicos, disminución de sangrado intraoperatorio y menor exposición del equipo quirúrgico a radiaciones ionizantes. Se describen también como beneficios la mejora en la comprensión de la anatomía por parte del equipo quirúrgico, la optimización de la planificación preoperatoria y una mayor seguridad intraoperatoria. Adicionalmente, se ha demostrado que el uso de biomodelos 3D en la comunicación con los pacientes y sus familias mejora la comprensión de la enfermedad y del procedimiento quirúrgico, facilitando la toma de decisiones informadas y reduciendo la ansiedad preoperatoria.

El Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR) cuenta con su propio laboratorio de impresión 3D en el PoC, que funciona en el Departamento de Imagenología. Esta iniciativa se alinea con la tendencia observada en centros hospitalarios internacionales, donde la integración de laboratorios de impresión 3D ha facilitado la fabricación de dispositivos en el propio hospital, reduciendo los tiempos de espera y los costos asociados a la tercerización de estos servicios.

Desarrollo del laboratorio en el CHPR

El Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR) implementa tecnologías 3D desde el año 2019 a través la Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D (PQV-I3D), en el Área de Innovación del Departamento de Imagenología, un sector pionero en la región en el uso de biomodelos, planificación virtual e impresión 3D en el ámbito hospitalario público. Este laboratorio ha sido reconocido a nivel local e internacional por su labor en la aplicación de estas tecnologías en cirugía complejas de diferentes especialidades médico quirúrgicas, entre ellas traumatología y ortopedia, cirugía maxilofacial, cirugía plástica, cirugía pediátrica general, ginecología y obstetricia.

En dicho equipo trabajan médicos imagenólogos, residentes y graduados de especialidades quirúrgicas, un licenciado en imagenología y cuenta con el apoyo de ingenieros y profesores de la Universidad Tecnológica (UTEC) siendo un área de desarrollo transdisciplinario dentro del CHPR. Por otra parte, el CHPR es un hospital escuela y residen en él múltiples servicios de la Universidad de la República que permiten la formación de pregrados y Postgrados de diversas especialidades médico-quirúrgicas.

Hasta la fecha se han apoyado más de 150 cirugías en más de 10 especialidades médico-quirúrgicas del CHPR, desarrollándose más de 200 biomodelos 3D, con una creciente demanda de planificación quirúrgica virtual y la inclusión de nuevas aplicaciones todas las semanas. Actualmente el laboratorio cuenta con 4

impresoras 3D tipo FDM, 2 impresoras 3D de resina tipo SLA y un escáner de mano de alta resolución, así como software y hardware de post procesamiento de imagen para planificación quirúrgica virtual.

La Dra. Silvina Zabala-Travers, líder del Área de Innovación en la que funciona la Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D, es referente en la aplicación y desarrollo de tecnologías 3D en medicina y participa activamente como docente y conferencista invitado en eventos y cursos nacionales e internacionales.

Necesidad y objetivos del proyecto

El Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR) es el principal referente en atención pediátrica en Uruguay y centro de referencia nacional para la realización de cirugías de alta complejidad en diversas especialidades. Desde 2019, el Área de Innovación del CHPR ha incorporado tecnologías 3D con el objetivo de optimizar la planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos complejos. No obstante, al inicio del proyecto ANII, la infraestructura y los recursos disponibles resultaban insuficientes para satisfacer la creciente demanda de estas herramientas, lo que limitaba su aplicación a un número reducido de pacientes. Previo a la implementación del proyecto, el acceso a biomodelos 3D estaba condicionado por la disponibilidad de equipamiento y la capacidad operativa del equipo multidisciplinario a cargo. La necesidad de establecer criterios de priorización restringía su uso a casos seleccionados, impidiendo una aplicación sistemática de la tecnología en todas las especialidades quirúrgicas.

Si bien la literatura internacional respalda los beneficios de la planificación quirúrgica asistida por tecnologías 3D, en Uruguay no existían estudios que cuantificaran su impacto de manera objetiva. Este proyecto surge con el propósito de generar evidencia científica local que permita evaluar rigurosamente el efecto del uso de biomodelos 3D, planificación virtual e impresión 3D en la planificación quirúrgica, proporcionando datos que fundamenten su implementación sistemática en el sistema de salud pública y promuevan su adopción sostenida a largo plazo, así como su incorporación en la formación de nuevos profesionales.

Adicionalmente, la adquisición de equipamiento para la ejecución del estudio ha permitido fortalecer el laboratorio del CHPR, incrementando su capacidad de respuesta y ampliando el acceso a estas herramientas para un mayor número de especialidades y pacientes. Esto representa una oportunidad estratégica para transformar el abordaje quirúrgico en la institución, consolidando el uso de tecnologías 3D como un estándar en la planificación y ejecución de cirugías pediátricas de alta complejidad en Uruguay.

Objetivos del proyecto

Objetivo General

El objetivo general del proyecto es la evaluación del impacto de la aplicación de biomodelos 3D virtuales, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D en el tratamiento de cirugías pediátricas complejas en el CHPR.

Objetivos Específicos

La evaluación del impacto de las tecnologías 3D en el proceso quirúrgico se realizó en tres etapas (prequirúrgica, intraoperatoria y postquirúrgica), planteándose objetivos específicos e indicadores para cada una de ellas.

Tiempo prequirúrgico

- Impacto en la modificación de estrategias quirúrgicas
- Indicador: Tasa de modificación estratégica tras la planificación con tecnologías 3D.

- Impacto en la seguridad del equipo quirúrgico
- Indicador: Encuestas de percepción de seguridad preoperatoria.
- Impacto en el tiempo de planificación preoperatoria
- Indicador: Tiempo promedio de planificación preoperatoria con uso de tecnologías 3D.

Tiempo quirúrgico

- Reducción del tiempo quirúrgico con biomodelos 3D
- Indicador: Tiempo promedio de cirugía en casos con y sin biomodelo impreso en 3D.
- Seguridad de los procedimientos con tecnología 3D
- Indicadores:
 - Pérdida de sangre (diferencia en hemoglobina pre y postoperatoria y necesidad de reposición sanguínea).
 - Exposición a radiaciones ionizantes.
 - Tasa de complicaciones intraoperatorias.
 - Tasa de complicaciones vinculadas a la tecnología 3D utilizada.
- Preferencia del equipo quirúrgico por las tecnologías 3D
- Indicadores:
 - Encuestas de preferencia de uso de tecnología 3D.
 - Encuestas de satisfacción con el resultado quirúrgico.

Tiempo postquirúrgico

- Impacto en la comunicación médico-paciente y su familia
- Indicadores:
 - Encuestas al equipo tratante sobre:
 - Facilidad para explicar el procedimiento.
 - Facilidad para explicar posibles complicaciones.
 - Facilidad en la obtención del consentimiento informado.
 - Percepción de comprensión de la enfermedad por parte del paciente y su familia.

Metodología/Diseño del estudio

Se trata de un estudio prospectivo, observacional y monocéntrico, que se viene desarrollando en el Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR) desde Marzo 2023 hasta Diciembre 2024 (22 meses), con el objetivo de evaluar el impacto de la aplicación de biomodelos 3D virtuales, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D en tratamientos quirúrgicos de alta complejidad en la población pediátrica.

Población y criterios de inclusión

Se incluyen pacientes usuarios del CHPR que requieren planificación quirúrgica virtual, a solicitud del cirujano o equipo tratante. La selección se realiza de acuerdo con los siguientes criterios.

- Criterios de inclusión:
 - Pacientes pediátricos menores de 20 años.
 - Diagnóstico de una patología que requiera intervención quirúrgica compleja.
 - Solicitud de biomodelado 3D y/o planificación virtual por parte del equipo quirúrgico.
- Criterios de exclusión:
 - Pacientes mayores de 20 años inclusive.
 - Falta de datos en el formulario de recolección de información.

--Casos en los que la planificación quirúrgica no fue utilizada en la toma de decisiones intraoperatorias.

Diseño y procedimiento

Recolección de datos

Los datos se registran mediante un formulario virtual, accesible vía web, que se completa por el profesional solicitante de la planificación quirúrgica. El formulario incluye información prequirúrgica, intraoperatoria y postoperatoria.

Procesamiento de imágenes, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D

El procesamiento de imágenes y la planificación quirúrgica se realiza según los siguientes pasos:

- Adquisición de imágenes

Las imágenes se adquieren en el Departamento de Imagenología del Centro Hospitalario Pereira Rossell (tomógrafo GE, Revolution EVO, 64 hileras; resonador magnético GE, Signa Voyager, 1.5T). En algunos casos se utilizan imágenes adquiridas previamente en centros externos. Las imágenes se descargan del Sistema PACS (por la sigla en inglés Picture Archiving and Communication System) en formato DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine).

- Biomodelado 3D

Los biomodelos 3D se crean a partir de TC, RM o de la fusión de ambos estudios. Las imágenes se cargan en el software específico para dicho fin (Inobitec DICOM Viewer PRO®). Se realiza la segmentación o selección de estructuras anatómicas de interés y se convierten las imágenes DICOM en modelos tridimensionales de la anatomía del paciente (en formato .STL).

Los biomodelos 3D se comparten con el equipo quirúrgico utilizando el software M3DMix y M3Desk que permite la navegación de los modelos 3D a través del teléfono o la computadora del cirujano para el estudio anatómico del paciente.

- Planificación quirúrgica virtual y diseño de guías quirúrgicas

El caso clínico se discute en ateneo médico con el equipo quirúrgico tratante en el que se utiliza el biomodelo 3D para planificar la estrategia quirúrgica.

En los casos en que es necesaria la cirugía virtual se utiliza el software Inobitec DICOM Viewer PRO® o Autodesk Meshmixer®.

Para el diseño de herramientas quirúrgicas personalizadas se utiliza el software Autodesk Meshmixer® para dicho fin.

- Impresión 3D y esterilización

En los casos necesarios se imprimen los biomodelos 3D con diferentes materiales de acuerdo al uso que se le dará al modelo:

Los modelos para estudio anatómico se imprimen utilizando tecnología FDM (fused deposition modeling) utilizando impresoras las impresoras Ultimaker 2, Creality KE, Raise 3D Pro o Bambú Lab, éstas dos últimas adquiridas con fondos del proyecto ANII-FSS. Se utiliza generalmente el material PLA (ácido poliláctico), un material símil plástico biodegradable y de bajo costo.

Las guías quirúrgicas se imprimen con tecnología SLA (esterolitografía) con resinas biocompatibles, mediante la impresora Anycubic Photon o Formlabs 4B, ésta última adquirida con fondos del proyecto ANII-FSS.

En algunos casos, se requiere material flexible, para lo que se utiliza de acuerdo al caso TPU (tecnología FDM) o resinas flexibles Elastic 50A (Formlabs 4B)

El tiempo promedio de impresión 3D de piezas anatómicas es de 6-12 horas, para piezas medianas y de 28 a 24 horas para piezas grandes (columnas o férulas). El tiempo promedio de impresión de guías quirúrgicas es de 3 horas

La esterilización se realiza según los protocolos convencionales:

- Óxido de etileno o Peróxido para modelos impresos en PLA.
- Autoclave con protocolo de látex para resinas biocompatibles.

Variables analizadas en el estudio:

****Variables prequirúrgicas**

- Tiempo total de planificación quirúrgica (medido en horas).
- Cambio de estrategia quirúrgica antes y después del uso de biomodelos 3D (Sí/No).
- Sensación de seguridad del equipo quirúrgico antes de la cirugía (escala de 1 a 10).

****Variables intraoperatorias**

- Duración total de la cirugía (medido en minutos).
- Exposición a radiaciones ionizantes del paciente y equipo médico (número de disparos).
- Tasa de sangrado intraoperatorio, evaluado por:
- Diferencia en hemoglobina pre y postoperatoria (g/dL).
- Volumen de sangre transfundida.
- Grado de conformidad con el resultado según la planificación (escala de 1 a 10).
- Presencia de hallazgos anatómicos inesperados (Sí/No).
- Cambio de estrategia quirúrgica intraoperatoria (Sí/No).
- Complicaciones intraoperatorias (Sí/No).
- Preferencia del equipo quirúrgico por el uso de biomodelos 3D (Sí/No).
- Complicaciones con el material quirúrgico (impresiones 3D anatómicas, guías quirúrgicas) (Sí/No).

****Variables postquirúrgicas**

- Presencia de complicaciones postoperatorias (Sí/No).
- Días de estancia hospitalaria (medido en días).
- Variables de comunicación con la familia
- Facilidad para explicar el procedimiento y sus complicaciones (escala de 1 a 10).
- Facilidad para obtener el consentimiento informado (escala de 1 a 10).
- Sensación de comprensión de la enfermedad por parte de la familia (escala de 1 a 10).

Control de calidad y gestión de datos faltantes

Los datos incompletos fueron revisados y, en caso de inconsistencias, se contactó al cirujano responsable para su corrección.

Se consideraron pérdidas de datos aquellos casos en los que el formulario de recolección de información no fue completado en su totalidad.

casos sin el uso de estas tecnologías.

Análisis estadístico

El análisis estadístico del estudio combinó métodos descriptivos, pruebas de hipótesis y modelos

predictivos para evaluar el impacto de la tecnología 3D en la planificación quirúrgica y la percepción de los equipos médicos y familiares. Se emplearon pruebas de Mann-Whitney U para comparar la comprensión de los procedimientos por parte de las familias, regresión logística binaria para analizar la influencia del uso de biomodelos en la modificación de la estrategia quirúrgica, medidas de tendencia central y distribución de frecuencias para evaluar la seguridad percibida.

Aspectos éticos

El estudio garantiza la confidencialidad de los datos. La participación de los pacientes y sus familias se realizó con consentimiento informado, y los datos se procesaron de manera anónima. El protocolo del estudio fue presentado y aprobado por el Comité de Ética del CHPR.

Resultados, análisis y discusión

Actualmente, el estudio se encuentra en fase de recolección de datos, avanzando en la recopilación y análisis de información para evaluar el impacto de los biomodelos 3D en la planificación y ejecución quirúrgica. A partir de datos preliminares, se ha realizado un primer análisis que permite identificar tendencias de interés, que se describirán a continuación. No obstante, para fortalecer la solidez estadística de los resultados y garantizar conclusiones más robustas, entendemos que es necesario ampliar el tamaño muestral. Los datos adicionales que se continúen recolectando serán fundamentales para consolidar los hallazgos del proyecto y servirán de base para futuras publicaciones científicas, permitiendo una difusión más amplia del impacto de estas tecnologías en la práctica clínica.

El estudio incluyó un total de 47 pacientes pediátricos distribuidos en distintas especialidades quirúrgicas:

Traumatología y Ortopedia: 17 pacientes (36.2%)

Cirugía Pediátrica General: 10 pacientes (21.3%)

Cirugía de Columna: 8 pacientes (17.0%)

Oncología Ortopédica: 7 pacientes (14.9%)

Cirugía de Tórax: 2 pacientes (4.3%)

Odontología: 2 pacientes (4.3%)

Cirugía Plástica: 1 paciente (2.1%)

En todos los pacientes se realizó planificación quirúrgica virtual con biomodelos 3D.

La impresión 3D fue utilizada en el 42.6% de los casos, con una mayor aplicación en especialidades como traumatología y ortopedia que requieren modelos físicos para optimizar la planificación y ejecución quirúrgica.

Las guías quirúrgicas diseñadas con tecnología 3D fueron empleadas en el 17.0% de los procedimientos. Finalmente, la navegación intraoperatoria fue utilizada en el 2.1% de los casos, mostrando un inicio en su implementación dentro del hospital.

El tiempo promedio de creación de biomodelos 3D fue de 70 minutos, lo que indica que el proceso de modelado 3D es relativamente rápido y no representa una gran carga de trabajo adicional. El tiempo promedio de planificación quirúrgica para estos pacientes complejos es de 150 minutos

Se presentan a continuación los hallazgos que, en este análisis preliminar, han demostrado un impacto

significativo en la planificación y ejecución quirúrgica con el uso de biomodelos 3D.

1) Cambio en la Estrategia Quirúrgica:

En el 68% de los casos, la planificación preoperatoria con biomodelos 3D llevó a un cambio en la estrategia quirúrgica.

El uso de biomodelos impresos en 3D mostró una tendencia a aumentar la probabilidad de modificar la estrategia quirúrgica (OR = 2.73), aunque este resultado no alcanzó significancia estadística ($p = 0.116$), por lo que se requieren más datos para confirmarlo.

Esto es un dato clave porque indica que la planificación virtual y los modelos físicos afectan la toma de decisiones prequirúrgicas, lo que sugiere que esta tecnología tiene un impacto directo en cómo se planifican las cirugías.

2) Los equipos tratantes calificaron con 9.35/10 la mejora en la visualización y comprensión anatómica al utilizar biomodelos 3D comparado con el análisis exclusivo de las imágenes médicas convencionales, destacando su utilidad como complemento de las mismas (TC/RM).

3) El 79.6% de los encuestados reportó un nivel de seguridad "Alto" previo al procedimiento (?7 en la escala de 1 a 10) tras haber utilizado tecnología 3D en la planificación quirúrgica, destacando su impacto en la confianza del equipo médico. Si bien los datos indican que la impresión 3D de los modelos anatómicos podría estar asociada con una mayor seguridad percibida, la ausencia de significancia estadística impide extraer conclusiones definitivas. Sería necesario ampliar el tamaño de la muestra para determinar si esta tendencia responde a un efecto real o a variaciones aleatorias en los datos.

4) La satisfacción del equipo quirúrgico fue mayormente positiva, con un promedio de 8.16/10, lo que indica que procedimientos en los que se usan tecnologías 3D se asocian a un alto nivel de satisfacción del equipo quirúrgico.

Los resultados en 3) y 4) destacan que, a pesar de la complejidad de las patologías y los procedimientos, los equipos quirúrgicos mantuvieron un alto nivel de confianza en la planificación y ejecución de las cirugías en pacientes en los que utilizaron tecnologías 3D.

5) Se encontró una diferencia significativa en la percepción de comprensión de los familiares sobre la enfermedad y el procedimiento cuando se utilizaron biomodelos 3D para la explicación ($p=0,034$). Este hallazgo respalda la idea de que la tecnología 3D no solo es útil desde una perspectiva técnica o quirúrgica, sino que también tiene un papel fundamental en la humanización de la atención médica. Al mejorar la comunicación, se refuerza la relación de confianza entre el equipo médico y la familia, lo que podría traducirse en mayor adhesión al tratamiento y menor incidencia de conflictos o incertidumbre en la toma de decisiones.

6) El 100% de los médicos encuestados expresó su preferencia por el uso de herramientas de tecnología 3D en su práctica clínica.

Este hecho resalta la aceptación generalizada y el impacto positivo percibido de estas tecnologías en la planificación y ejecución quirúrgica.

Limitaciones del Análisis de Datos

Si bien los resultados preliminares han permitido identificar tendencias relevantes, el análisis presenta

algunas limitaciones que deben considerarse al interpretar los hallazgos:

- Tamaño global reducido de la muestra: A pesar de que el estudio abarca múltiples especialidades quirúrgicas, el número total de casos analizados hasta el momento sigue siendo limitado. Sin embargo, las tendencias observadas hasta ahora —como el impacto en la modificación de estrategias quirúrgicas, la preferencia del equipo médico por el uso de tecnologías 3D y la mejora en la comunicación con los pacientes y sus familias— son independientes de la heterogeneidad de los grupos, ya que corresponden a elementos transversales a todas las cirugías. Consideramos que un aumento en el tamaño muestral permitirá reforzar estos hallazgos con un análisis discriminado por categoría, sin alterar las conclusiones generales.

- Heterogeneidad de los casos y tamaño muestral por categoría: La diversidad de patologías y procedimientos incluidos introduce una variabilidad significativa en los datos. Además, el tamaño de la muestra dentro de cada categoría quirúrgica sigue siendo insuficiente para realizar análisis específicos y extraer conclusiones definitivas sobre el impacto de los biomodelos 3D en cada especialidad. Se prevé que la recolección de datos en curso permita incrementar el número de casos y reducir esta limitación.

- Falta de comparación con grupos controles sin tecnología 3D: Hasta el momento, no se ha realizado una comparación directa con datos históricos de cirugías realizadas sin el uso de biomodelos 3D. Es probable que dado el impacto positivo observado y la preferencia del equipo médico por estas tecnologías hagan inviable, desde un punto de vista ético, la conformación de grupos control sin uso de tecnología 3D.

- Sesgo de selección. Uno de los principales sesgos de este estudio es el sesgo de selección, dado que los casos en los que se aplicaron tecnologías 3D fueron mayoritariamente pacientes con patologías complejas que requerían una planificación detallada. Esto puede influir en los resultados, ya que la muestra no es completamente representativa de todas las cirugías realizadas en el hospital.

- Asimismo, existe un sesgo de confirmación, ya que es el propio equipo quirúrgico quien solicita la planificación con biomodelos 3D, lo que implica una predisposición positiva hacia la utilidad de esta tecnología. En consecuencia, la preferencia por su uso no puede interpretarse como una comparación neutral, sino como una validación dentro de un grupo que ya reconoce su valor.

- Por otro lado, en algunos casos no se imprimió el biomodelo en 3D porque la patología no lo ameritaba, lo que podría introducir diferencias en los hallazgos si se discrimina este factor en el análisis por categorías. Esto sugiere que una comparación más detallada entre los casos con planificación virtual y aquellos con impresión 3D permitiría afinar las conclusiones sobre el impacto de cada herramienta en particular.

Otras ventajas percibidas de la tecnología 3D en la práctica quirúrgica

Además de los resultados cuantitativos obtenidos, las conversaciones informales con los médicos refuerzan el impacto positivo que tienen las herramientas 3D en la planificación y ejecución de procedimientos quirúrgicos. Estas percepciones cualitativas aportan una dimensión clave sobre la aplicabilidad real de estas tecnologías en el entorno clínico.

- Profundización en la discusión de casos: Los médicos han expresado que la posibilidad de contar con biomodelos 3D les permite analizar los casos con mayor profundidad, facilitando la evaluación detallada de estructuras anatómicas complejas. Repasar varias veces el procedimiento antes de la cirugía ayuda a reforzar la estrategia quirúrgica, anticipando posibles dificultades y optimizando la toma de decisiones.

- Mejora en la seguridad quirúrgica y adaptabilidad: La capacidad de visualizar y manipular los biomodelos antes de la cirugía permite a los equipos médicos ajustar estrategias, identificar limitaciones y realizar modificaciones cuando es necesario, evitando improvisaciones en el intraoperatorio. La práctica previa de procedimientos con modelos impresos les ha permitido darse cuenta de que ciertas estrategias iniciales no iban a funcionar, favoreciendo la adopción de enfoques más seguros y efectivos antes de ingresar al quirófano.

- Desarrollo de la inteligencia táctil y percepción espacial: La posibilidad de tocar y manipular biomodelos físicos no solo mejora la comprensión anatómica sino que también fortalece la inteligencia táctil, facilitando la interpretación de dimensiones y proporciones en un contexto realista. El contacto directo con los modelos refuerza la percepción del tamaño de estructuras anatómicas en relación con el instrumental quirúrgico y el acceso intraoperatorio, mejorando la precisión de las intervenciones.
- Impacto en la formación y entrenamiento quirúrgico La simulación con biomodelos permite a los cirujanos, especialmente a aquellos en formación, ensayar el procedimiento previamente, lo que les otorga mayor confianza y reduce la incertidumbre al momento de la cirugía real. Esta herramienta de práctica facilita la identificación de pasos críticos o posibles dificultades, promoviendo la toma de decisiones basada en la experiencia directa con el modelo.

Impacto más allá del Objetivo Inicial

La adquisición de equipamiento de alta tecnología en la Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D del Departamento de Imagenología del CHPR ha tenido un impacto mucho mayor que el cuantificable a través de las métricas definidas en este proyecto de investigación. La disponibilidad de nuevas tecnologías ha transformado significativamente nuestra capacidad de atención, expandiendo nuestro alcance más allá de la cirugía pediátrica.

Expansión hacia Odontología

Uno de los avances más destacados ha sido la incorporación de la odontología como nueva área de aplicación. Con la adquisición del escáner facial y la impresora Formlabs, hemos impulsado proyectos que van más allá de la cirugía. Ahora es posible realizar un análisis y seguimiento detallado del crecimiento y desarrollo buco-odonto-maxilo-facial a lo largo de toda la edad pediátrica, así como optimizar el tratamiento de pacientes complejos mediante la fabricación de aparatos de ortodoncia personalizados. Esta evolución nos posiciona a la vanguardia en el cuidado integral de la salud oral pediátrica en el país.

Expansión a la Rehabilitación: Impresión 3D de Férulas Personalizadas

En colaboración con el departamento de fisioterapia y rehabilitación, la impresión 3D ha marcado un antes y un después. Gracias a la impresora 3D RAISE 3D, que permite la fabricación de estructuras de gran volumen, hemos comenzado a diseñar e imprimir férulas y dispositivos de rehabilitación personalizados y a medida para pacientes de la Unidad de Quemados (UNIKUER) y pacientes parapléjicos, mejorando el resultado de tratamientos, reduciendo tiempos de espera y optimizando costos hospitalarios. Esto ha elevado la calidad asistencial de estos pacientes a la vez de brindar herramientas innovadoras a los profesionales que trabajan en rehabilitación.

Innovación en la Simulación Médica

La colaboración con el Departamento de Emergencia Pediátrica del CHPR y estudiantes y docentes de Bioingeniería de la Universidad Tecnológica (UTEC) ha sido un hito clave en el desarrollo de simuladores médicos para la capacitación en procedimientos invasivos y mínimamente invasivos, incluyendo suturas y la extracción de cuerpos extraños en oído y cavidad nasal, proporcionando un entorno seguro y realista para el entrenamiento clínico.

Además, en conjunto con el Departamento de Ginecología y Obstetricia, hemos avanzado en la creación de simuladores para cirugía ginecológica, enfocados en procedimientos en cuello uterino, mientras que con el Departamento de Cirugía Pediátrica, estamos desarrollando simuladores específicos para la cirugía torácica pediátrica. Estas iniciativas no solo fortalecen la formación de nuevos profesionales, sino que también elevan los estándares de seguridad y precisión en la práctica médica, garantizando una mejor preparación antes de la intervención en pacientes reales.

Impacto en la Cirugía Plástica y Oncológica: Casos Inéditos

Nuestro laboratorio ha colaborado también en el tratamiento de pacientes adultos en el Hospital de Clínicas, particularmente en el área de cirugía plástica, incluyendo un caso inédito de reconstrucción auricular mediante planificación quirúrgica virtual e impresión 3D con resinas flexibles gracias a la impresora Formlabs, un verdadero testimonio del potencial de esta tecnología.

De igual forma, en colaboración con el grupo UPOME (Unidad de Pacientes de Oncología Músculo Esquelética), hemos optimizado el tratamiento de más de 10 pacientes adultos con patologías oncológicas complejas, en los que se aplicó biomodelado, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D, ampliando el horizonte de lo inicialmente planificado.

El impacto de estas herramientas ha trascendido especialidades, fortaleciendo la colaboración interdisciplinaria y beneficiando tanto a los pacientes como a los equipos de salud. Este crecimiento es motivo de orgullo y nos impulsa a seguir innovando.

Dificultades y Oportunidades

La implementación del proyecto ANII FSS en el CHPR presentó diversos desafíos logísticos, técnicos y administrativos. Sin embargo, el compromiso y la flexibilidad del equipo permitieron superar estos obstáculos y, a su vez, generaron oportunidades para mejorar y ampliar la capacidad tecnológica del laboratorio. A continuación, se resumen los desafíos enfrentados, cómo se resolvieron y las oportunidades que surgieron a partir del cambio de estrategia.

1. Desafíos en la Ejecución y Estrategias de Superación

a. Logística y Tiempos de Entrega de Equipamiento

La impresora RAISE3D, pieza clave para la impresión de modelos de gran volumen, se adquirió bajo modalidad CIF con un plazo de entrega de 90 días; sin embargo, su arribo se retrasó 6 meses, afectando la planificación inicial de incremento de la capacidad del laboratorio.

La adquisición del sistema Formlabs para impresión en resina sufrió un retraso de 30 días, y una de las máquinas llegó defectuosa (no funcional). La empresa proveedora reemplazó el equipo, pero la resolución del problema tomó más de un mes.

b. Fallas en Equipos y Reposición de Recursos Informáticos

Las dos computadoras adquiridas para el proyecto presentaron fallas en los discos duros pocas semanas después de su compra.

Tras negociaciones, se logró la reposición de una unidad y la reparación de la otra, aunque este proceso generó retrasos en el biomodelado 3D y en la planificación virtual.

Para mitigar los efectos, el equipo del laboratorio trabajó con sus computadoras personales para hacer posible la continuidad de las actividades.

c. Obstáculos en la Adquisición de Lentes de Realidad Aumentada

El objetivo inicial del proyecto incluía la incorporación de tecnologías de realidad aumentada en la planificación quirúrgica, sin embargo no fue posible concretar la compra. Un mes después de haber cobrado el depósito del 50% (?5000 USD) para la importación del equipamiento, el proveedor (único en Uruguay) notificó su imposibilidad de importar el producto a Uruguay y canceló la compra.

La devolución del dinero implicó trámites administrativos complejos con Facultad de Medicina y demoró la disponibilidad de dinero más de 30 días.

Se intentó adquirir los lentes con representantes de Microsoft y Apple en Uruguay, pero ninguna de las dos empresas tenía el producto registrado para venta en el país ni les interesaba hacerlo.

Se exploró la compra directa desde EE.UU. pero no se logró obtener cotización ni respuestas concretas vía formularios web y llamadas telefónicas.

Durante un viaje a presentar el proyecto en Miami, EE.UU., se realizaron reuniones en las oficinas de Apple, quienes mostraron interés en colaborar en la investigación y se comprometieron a enviar propuestas de venta, las cuales nunca llegaron.

Finalmente, dado que el proyecto se encontraba en su período de prórroga, se decidió modificar el objetivo inicial y evaluar otra tecnología 3D en lugar de la realidad aumentada. Se optó por adquirir el ecosistema de impresoras de resina Formlabs como alternativa.

Irónicamente, una semana después de haber confirmado la compra del nuevo equipamiento, Apple EE.UU. envió una respuesta positiva ofreciendo la venta y envió de los lentes a Uruguay, pero para entonces ya no era posible modificar nuevamente la planificación del proyecto.

d. Recursos Humanos y Ritmo del Proyecto

La investigadora principal estuvo de licencia por maternidad de 3 meses, complementada con un año de medio horario, lo que redujo temporalmente la disponibilidad de recursos humanos especializados para el biomodelado y la planificación virtual.

A pesar de esta interrupción, el proyecto se mantuvo activo, adaptando el ritmo de trabajo sin detenerse, lo que permitió continuar con las actividades esenciales.

e. Problemas de Infraestructura del Laboratorio

El salón asignado por el hospital para las actividades del laboratorio sufrió dos inundaciones severas, afortunadamente sin daños al equipamiento pero obligando a evacuar temporalmente el equipamiento para reparaciones.

Además, la unidad de ventilación se bloqueó por el ingreso de aves, afectando temporalmente la operatividad del espacio.

Aunque las reparaciones fueron financiadas por el hospital, estas incidencias retrasaron las actividades por varias semanas.

f. Reducción del Período de Equipamiento Completo

Los retrasos en la recepción de equipamiento implicaron que el laboratorio quedara completamente operativo recién en octubre de 2025.

Aunque la recolección de datos se inició desde el principio, el tiempo durante el cual se trabajó con el laboratorio totalmente equipado fue menor, lo que influyó en la cantidad total de pacientes incluidos hasta el momento en el estudio.

Los diversos retrasos en la entrega de equipamiento, fallas en computadoras y problemas de infraestructura llevaron a solicitar una prórroga adicional, la cual se sumó a la ya otorgada por la licencia por maternidad. Este tiempo extra fue fundamental para compensar los retrasos y asegurar la finalización de la implementación del equipamiento y la mayor recolección de datos clínicos.

2. Oportunidades Generadas y Nuevas Adquisiciones Tecnológicas

a. Cambio de Tecnología y Optimización del Presupuesto

La imposibilidad de adquirir los lentes de realidad aumentada, sumada a la reducción de precios en el

mercado, permitió reorientar el enfoque tecnológico del proyecto.

Se incorporó una impresora multimaterial, la Bambu Lab P1S + AMS, que permite la impresión en múltiples colores, haciendo viable la impresión 3D de modelos anatómicos complejos para cirugía pediátrica general.

Adquisición de la Impresora Ecosistema Formlabs 4B. Esta tecnología permite ampliar las aplicaciones clínicas al posibilitar la fabricación de guías quirúrgicas con materiales más fiables y precisos, así como el uso de resinas flexibles para adaptarse a las necesidades del paciente.

b. Impacto Positivo en la Operatividad del Laboratorio

La incorporación de estas nuevas tecnologías, a pesar de los retrasos iniciales, no sólo compensa los inconvenientes, sino que también potenció las capacidades del laboratorio, ofreciendo herramientas innovadoras para la planificación y ejecución quirúrgica.

Conclusiones y recomendaciones

El proyecto "Impacto de la aplicación de biomodelos 3D virtuales, planificación quirúrgica virtual e impresión 3D en tratamientos quirúrgicos de alta complejidad en la edad pediátrica", desarrollado en el Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR), ha demostrado con evidencia sólida los beneficios de la implementación de tecnologías 3D en la planificación y ejecución de cirugías complejas.

Los resultados obtenidos reflejan un impacto positivo y significativo en múltiples aspectos del proceso quirúrgico, consolidando el uso de estas herramientas como un recurso innovador y eficiente en la práctica clínica.

Gracias a la inversión en impresoras 3D FDM y SLA, un escáner 3D de alta precisión, software especializado y laptops para planificación virtual, el laboratorio de impresión 3D del CHPR ha ampliado su capacidad operativa. Estas incorporaciones han permitido un acceso más amplio a la tecnología para un mayor número de especialidades y pacientes.

El 100% de los procedimientos analizados fueron planificados con biomodelos 3D virtuales y todos los equipos tratantes demuestran su preferencia por trabajar con tecnologías 3D. La planificación tridimensional permitió una mejor comprensión de la anatomía y facilitó la toma de decisiones quirúrgicas, optimizando la estrategia preoperatoria.

En el presente proyecto se identificó un impacto positivo en los siguientes aspectos:

1) Impacto en la toma de decisiones quirúrgicas

El hecho de que en el 68% de los casos la planificación quirúrgica con biomodelos 3D haya llevado a una modificación en la estrategia quirúrgica demuestra el impacto directo de estas tecnologías en la toma de decisiones médicas. Este cambio permite optimizar abordajes quirúrgicos que en muchas ocasiones salvan miembros y articulaciones, reducir riesgos intraoperatorios y, en muchos casos, optar por procedimientos menos invasivos y más precisos. A partir de este hallazgo, se recomienda formalizar el uso de biomodelos 3D en la planificación prequirúrgica, establecer protocolos clínicos para la selección de casos que se benefician más de esta herramienta e impulsar la capacitación continua del equipo quirúrgico en el uso e interpretación de biomodelos digitales e impresos para maximizar su impacto en la seguridad y eficiencia quirúrgica.

2) Mejora en la seguridad y confianza del equipo quirúrgico

El 79.6% de los cirujanos reportó un alto nivel de confianza (?7/10) en la planificación quirúrgica con biomodelos 3D a pesar de tratarse de pacientes de alta complejidad. Esta percepción de seguridad tiende a aumentar cuando se cuenta con los biomodelos impresos en 3D, en particular en casos de traumatología y ortopedia, probablemente como soporte a la inteligencia táctil de los cirujanos, porque permiten la manipulación y visualización aún más detallada de estructuras anatómicas y la simulación de diferentes escenarios quirúrgicos. Dado este impacto positivo, se recomienda ampliar el acceso a la impresión 3D en casos seleccionados, promoviendo su integración en especialidades donde la precisión anatómica y la anticipación de escenarios intraoperatorios son críticas.

3) Beneficios en la comunicación con pacientes y familias

El uso de biomodelos 3D en la explicación del procedimiento mejoró significativamente la comprensión de la patología y sus complicaciones por parte de las familias ($p=0.034$), según la percepción del equipo tratante. Esta mejora en la comunicación reduce la ansiedad preoperatoria, facilita la toma de decisiones informadas y fortalece la relación de confianza entre médicos y pacientes. A partir de este hallazgo, se recomienda incorporar de manera sistemática el uso de biomodelos 3D en las consultas prequirúrgicas, asegurando que cada paciente y su familia tengan acceso a una explicación clara y visual del procedimiento.

Además de los datos obtenidos a través del formulario de resultados, se recogieron comentarios espontáneos de los cirujanos que refuerzan la preferencia generalizada por el uso de tecnologías 3D en la planificación quirúrgica. Muchos profesionales destacaron que el acceso a biomodelos 3D les permite analizar los casos con mayor profundidad, facilitando la identificación de estructuras anatómicas complejas y la anticipación de posibles dificultades intraoperatorias. Asimismo, señalaron que el uso de modelos físicos impresos ha sido especialmente útil para la visualización táctil y la educación de cirujanos en formación, permitiendo ensayar distintos abordajes antes de la cirugía real. Estos comentarios subrayan el alto impacto positivo que los cirujanos perciben en el uso de tecnologías 3D, incluso más allá de los indicadores medidos formalmente, consolidando la necesidad de expandir y fortalecer su implementación en el hospital.

La implementación de tecnologías 3D ha trascendido el objetivo original, extendiéndose a nuevas especialidades dentro y fuera del CHPR como odontología, rehabilitación y simulación médica, generando nuevas oportunidades de aplicación, con impacto en niños y adultos. Se ha fortalecido la colaboración con diferentes especialidades médicas y áreas de investigación, promoviendo una visión interdisciplinaria del uso de biomodelos 3D en la salud.

La implementación del biomodelado 3D en un hospital requiere un equipo altamente especializado, donde el médico radiólogo con formación en biomodelado 3D y planificación quirúrgica virtual juega un rol fundamental dentro de una Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual. Su participación es clave para garantizar la seguridad y precisión quirúrgica, ya que es el profesional capacitado para realizar el postprocesamiento avanzado de imágenes médicas y transformar estudios en modelos tridimensionales anatómicamente fieles. El tiempo promedio de segmentación y generación de biomodelos 3D es de 70 minutos, lo cual no representa una carga excesiva, pero sí un aspecto que debe considerarse al planificar la implementación de este servicio en un hospital.

A esto se suma el tiempo de impresión 3D, que varía desde unas pocas horas en modelos pequeños hasta más de un día en estructuras complejas como columnas vertebrales, seguido por un proceso de postprocesamiento que puede requerir varias horas adicionales para la optimización de las piezas

impresas. Para esta etapa, es esencial contar con bioingenieros o técnicos especializados en impresión 3D, profesionales que han sido incorporados en hospitales de referencia a nivel internacional y cuya presencia en estas unidades representa una oportunidad de crecimiento y modernización del sistema de salud. Incluir estos perfiles en el ámbito hospitalario no solo optimiza la producción y calidad de los biomodelos, sino que también fortalece el equipo multidisciplinario, permitiendo la adopción eficiente de nuevas tecnologías para mejorar la seguridad, la precisión quirúrgica y, en última instancia, los resultados clínicos de los pacientes.

La navegación intraoperatoria es una tecnología en creciente adopción que permite localizar con precisión estructuras anatómicas en tiempo real durante la cirugía, guiando al equipo quirúrgico con una exactitud milimétrica. Cuando se combina con biomodelos 3D y guías quirúrgicas personalizadas, permite una planificación aún más precisa y una ejecución quirúrgica optimizada, mejorando la alineación, el posicionamiento de guías e implantes y la preservación de estructuras críticas. Estos beneficios han sido ampliamente reportados en estudios internacionales, sin embargo, en nuestro contexto no ha sido posible obtener más datos sobre su impacto, ya que su uso ha sido limitado debido a restricciones presupuestarias y logísticas.

Actualmente, en el Centro Hospitalario Pereira Rossell (CHPR), la navegación intraoperatoria no está contemplada dentro de la previsión de gastos, lo que significa que su uso depende de autorizaciones específicas de la dirección hospitalaria para la compra del servicio a terceros. Esto ha llevado a que no siempre esté disponible y a que, en muchos casos, los equipos quirúrgicos no la soliciten, ya que saben que el acceso es limitado. A pesar de estas barreras, la experiencia en el presente estudio sugiere que su expansión podría ser altamente beneficiosa, especialmente en especialidades como cirugía de columna, ortopedia oncológica y cirugía maxilofacial, donde la precisión es crítica para evitar daños en estructuras vitales.

Para impulsar su uso recomendamos:

- Facilitar el acceso regular a la navegación intraoperatoria, asegurando su disponibilidad en procedimientos donde pueda marcar una diferencia en la precisión quirúrgica y seguridad del paciente.
- Fortalecer la capacitación del equipo quirúrgico, promoviendo su utilización cuando el caso lo requiera.
- Establecer protocolos para la selección de casos en los que la navegación intraoperatoria aporte un beneficio clínico claro.
- Evaluar la viabilidad de adquisición de equipamiento de navegación intraoperatoria, que permitiría un acceso más amplio y una reducción en los costos asociados a la compra del servicio a terceros.

Si se lograra una disponibilidad más habitual de la navegación intraoperatoria, su uso se facilitaría y normalizaría, beneficiando a un mayor número de pacientes y optimizando la seguridad de los procedimientos quirúrgicos. En centros de referencia internacionales, la navegación intraoperatoria ya forma parte de la rutina en procedimientos de alta complejidad. Su expansión en el CHPR representa una oportunidad para posicionar al hospital como un referente en innovación quirúrgica, elevando los estándares de precisión y seguridad en la cirugía pediátrica.

Otras recomendaciones de este grupo para maximizar el impacto de las tecnologías 3D son:

- Estandarización del uso de biomodelos 3D en la planificación quirúrgica:

Formalizar el uso de biomodelos 3D virtuales como parte del protocolo de planificación prequirúrgica en el CHPR.

Integrar esta tecnología en las guías clínicas de diferentes especialidades médicas y quirúrgicas.

Definir criterios clínicos para determinar cuándo la impresión 3D aporta un beneficio adicional en la planificación y ejecución de cirugías.

Optimizar el uso de materiales según la necesidad de cada procedimiento ya que el impacto de los modelos

impresos puede variar de acuerdo a la patología.

- Entrenamiento del equipo de salud

Entrenamiento de los equipos quirúrgicos para el uso de guías quirúrgicas personalizadas, para evitar errores frecuentes como la malposición o rotura.

Promover la utilización de guías quirúrgicas personalizadas, asegurando su integración en más especialidades.

Implementar programas de capacitación en planificación virtual, segmentación de imágenes y diseño 3D para el equipo de radiología.

- Trabajar en la Sustentabilidad y Expandir las Áreas de Actuación de la Unidad de Planificación Quirúrgica Virtual e Impresión 3D en el CHPR

Garantizar la disponibilidad de insumos y mantenimiento del equipamiento para asegurar la continuidad del servicio.

Incorporar radiólogos entrenados en biomodelado e impresión 3D dentro del laboratorio para asegurar la continuidad y optimización del servicio.

Incorporar bioingenieros o técnicos con formación en planificación quirúrgica virtual para optimizar y agilizar los procesos de impresión y postprocesamiento, permitiendo una mayor disponibilidad de biomodelos 3D.

Desarrollar estrategias para mejorar la eficiencia en la producción de biomodelos y su integración en la rutina hospitalaria.

- Expansión del impacto a nivel nacional

Explorar la posibilidad de replicar el modelo del CHPR en otros centros de salud del país. Difundir los resultados obtenidos a nivel académico y clínico para fomentar la adopción de estas tecnologías en otros hospitales públicos y privados.

- Incorporación de nuevas tecnologías disruptivas que permitan mantener al CHPR a la vanguardia de tratamientos innovadores

Evaluar la implementación de realidad virtual y aumentada en la planificación quirúrgica y la formación de profesionales.

Explorar el uso de inteligencia artificial

Analizar la integración de nuevas técnicas de bioimpresión para el desarrollo de estructuras más avanzadas en la cirugía reconstructiva.

Reflexión Final

El éxito de este proyecto ha consolidado el uso de tecnologías 3D en el CHPR, posicionando al hospital como un referente en innovación quirúrgica en la región. A través de la planificación virtual, impresión 3D, guías quirúrgicas y navegación intraoperatoria, se ha logrado optimizar la toma de decisiones, mejorar la precisión quirúrgica y fortalecer la comunicación con pacientes y familias.

A futuro, el desafío será seguir ampliando el acceso a estas herramientas, optimizar su implementación y explorar nuevas tecnologías disruptivas que continúen transformando la práctica quirúrgica en Uruguay. Con un equipo comprometido y una visión innovadora, este proyecto ha sentado las bases para la evolución de la cirugía pediátrica y la adopción de modelos de atención basados en tecnologías avanzadas.

Referencias bibliográficas

Valls-Esteve, Arnau, et al. "Point-of-care additive manufacturing: state of the art and adoption in Spanish hospitals during pre to post COVID-19 era." *3D Printing in Medicine* 10.1 (2024): 43.

Garza-Cisneros, Andrea Nallely, et al. "Cost-effective solution for maxillofacial reconstruction surgery with Virtual Surgical Planning and 3D printed cutting guides reduces operative time." *Plastic Surgery* 32.1 (2024): 70-77.

Wang, Xiaoxiao, et al. "3D printing materials and 3D printed surgical devices in oral and maxillofacial surgery: design, workflow and effectiveness." *Regenerative Biomaterials* 11 (2024): rbae066.

González-López, Pablo, et al. "The integration of 3D virtual reality and 3D printing technology as innovative approaches to preoperative planning in neuro-oncology." *Journal of Personalized Medicine* 14.2 (2024): 187.

Zabala-Travers, Silvina, and Andrés García-Bayce. "Setting up a biomodeling, virtual planning, and three-dimensional printing service in Uruguay." *Pediatric Radiology* 54.3 (2024): 438-449.

Travers, Silvina Zabala. "Biomodeling and 3D printing: A novel radiology subspecialty." *Annals of 3D Printed Medicine* 4 (2021): 100038.

Zabala-Travers, Silvina, Juan Sattler, and José Perdomo. "BIOMODELADO E IMPRESIÓN 3D EN URUGUAY: UNA NUEVA SUBESPECIALIDAD EN IMAGENOLOGÍA." *Revista de Imagenología* 24.2 (2021): 21-35.

Zambouri, A. "Preoperative evaluation and preparation for anesthesia and surgery." *Hippokratia* 11.1 (2007): 13

Belien H at al: Prebending of osteosynthesis plate using 3D printed models to treat symptomatic os acromiale and acromial fracture. *J Exp Orthop* 2017.

Punyaratabandhu, Thipachart, Peter C. Liacouras, and Sutipat Pairojboriboon. "Using 3D models in orthopedic oncology: presenting personalized advantages in surgical planning and intraoperative outcomes." *3D printing in medicine* 4.1 (2018): 1-13.

Schwartz, L. H., et al. "Volumetric 3D CT analysis-an early predictor of response to therapy." *Journal of Clinical Oncology* 25.18_suppl (2007): 4576-4576.

Hallet, Julie, et al. "Systematic review of the use of preoperative simulation and navigation for hepatectomy: current status and future perspectives." *Journal of HepatoBiliaryPancreatic Sciences* 22.5 (2015): 353-362.

Biglino, Giovanni, et al. "Involving patients, families and medical staff in the evaluation of 3D printing models of congenital heart disease." *Communication & medicine* 12.2-3 (2016): 157-169.

Sternheim, Amir, et al. "3D Printing in Orthopedic Oncology." 3D Printing in Orthopaedic Surgery. Elsevier, 2019. 179-194.

Bizzotto N, Sandri A, Regis D, Romani D, Tami I, Magnan B: Three-dimensional printing of bone fractures: A new tangible realistic way for preoperative planning and education. Surg Innov 2015;5:548-551.

Kang HJ, Kim BS, Kim SM, et al. : Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture? Biomed Res Int 2019;2019:7059413.

Wan, Lei, et al. "Clinical feasibility and application value of computer virtual reduction combined with 3D printing technique in complex acetabular fractures." Experimental and therapeutic medicine 17.5 (2019): 3630-3636.

Ballard D, Mills P, Duszak R, Weisman J, Rybicki F, Woodard P: Medical 3D printing cost-savings in orthopedic and maxillofacial surgery: Cost analysis of operating room time saved with 3D printed anatomic models and surgical guides. Acad Radiol 2020;27:1103-1113.

Bizzotto N, Sandri A, Regis D, Romani D, Tami I, Magnan B: Three-dimensional printing of bone fractures: A new tangible realistic way for preoperative planning and education. Surg Innov 2015;5:548-551.

Kang HJ, Kim BS, Kim SM, et al. : Can preoperative 3D printing change surgeon's operative plan for distal tibia fracture? Biomed Res Int 2019;2019:7059413.

Wan, Lei, et al. "Clinical feasibility and application value of computer virtual reduction combined with 3D printing technique in complex acetabular fractures." Experimental and therapeutic medicine 17.5 (2019): 3630-3636.

Li, Jun, et al. "Rational design, bio-functionalization and biological performance of hybrid additive manufactured titanium implants for orthopaedic applications: A review." Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 105 (2020): 103671

Nguyen, Bach, et al. "Cranioplasty Using Customized 3-Dimensional–Printed Titanium Implants: An International Collaboration Effort to Improve Neurosurgical Care." World Neurosurgery 149 (2021): 174-180

Giannopoulos, Andreas A., et al. "Cardiothoracic applications of 3D printing." Journal of thoracic imaging 31.5 (2016): 253.

Milano, Elena Giulia, et al. "Current and future applications of 3D printing in congenital cardiology and cardiac surgery." The British journal of radiology 92.1094 (2019): 20180389.

Jackson K S Kwok, Rainbow W H Lau, Ze-Rui Zhao, Peter S Y Yu, Jacky Y K Ho, Simon C Y Chow, Innes Y P Wan,

Calvin S H Ng. Multidimensional printing in thoracic surgery: current and future applications. J Thorac Dis 2018;10(Suppl 6):S756. doi: 10.21037/jtd.2018.02.91.

Jon Zabaleta, Borja Aguinagalde, Iker López, Stephany M Laguna, Mikel Mendoza, Ainhoa Galardi, Luis Matey, Andrea Larrañaga, Gorka Baqueriza, Ander Izeta. Creation of a multidisciplinary and multicenter

study group for the use of 3D printing in general thoracic surgery: lessons learned in our first year experience. *Med Devices (Auckl)*. 2019 May 2;12:143-149. doi: 10.2147/MDER.S203610. eCollection 2019.

Hu, Wenbin, et al. "Three-dimensional computed tomography angiography and bronchography combined with three-dimensional printing for thoracoscopic pulmonary segmentectomy in stage IA non-small cell lung cancer." *Journal of Thoracic Disease* 13.2 (2021): 1187.

Li, Chengrun, et al. "Augmented Reality and 3-Dimensional Printing Technologies for Guiding Complex Thoracoscopic Surgery." *The Annals of Thoracic Surgery* (2020).

Bumm, R., et al. "First results of spatial reconstruction and quantification of COVID-19 chest CT infiltrates using lung CT analyzer and 3D slicer." *British Journal of Surgery* 108.Supplement_4 (2021): znab202-077.

Senkoylu, Alpaslan, Ismail Daldal, and Mehmet Cetinkaya. "3D printing and spine surgery." *Journal of Orthopaedic Surgery* 28.2 (2020): 2309499020927081.

Sun, Xiaojiang, et al. "Progress in the Application of 3D Printing Technology in Spine Surgery." *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)* 26.3 (2021): 352-360

Wang, Pengfei, et al. "The effect of new preoperative preparation method compared to conventional method in complex acetabular fractures: minimum 2-year follow-up." *Archives of Orthopaedic and Trauma Surgery* 141 (2021): 215-222.

Marinescu, Rodica, Diana Popescu, and Dan Laptoiu. "A Review on 3D-Printed Templates for Precontouring Fixation Plates in Orthopedic Surgery." *Journal of Clinical Medicine* 9.9 (2020): 2908.

Cuervas-Mons, Manuel, et al. "3D Printing Surgical Guide for Nonunion: Technique Tip." *Techniques in Orthopaedics* (2021).

Shen, Sheng, et al. "Pre-operative simulation using a three-dimensional printing model for surgical treatment of old and complex tibial plateau fractures." *Scientific reports* 10.1 (2020): 1-11.

Holt, Andrew M., et al. "Rapid prototyping 3D model in treatment of pediatric hip dysplasia: a case report." *The Iowa orthopaedic journal* 37 (2017): 157.

Lin, Alexander Y., and Lauren M. Yarholar. "Plastic surgery innovation with 3D printing for craniomaxillofacial operations." *Missouri medicine* 117.2 (2020): 136.

Lin, Hsiu-Hsia, Daniel Lonic, and Lun-Jou Lo. "3D printing in orthognathic surgery; A literature review." *Journal of the Formosan Medical Association* 117.7 (2018): 547-558.

Ganguli, Anurup, et al. "3D printing for preoperative planning and surgical training: a review." *Biomedical microdevices* 20.3 (2018): 1-24.

Smith, Brandon, and Prokar Dasgupta. "3D printing technology and its role in urological training." *World journal of urology* 38.10 (2020): 2385-2391.

Thiong'o, Grace M., Mark Bernstein, and James M. Drake. "3D printing in neurosurgery education: a review." 3D Printing in Medicine 7.1 (2021): 1-6.

Sánchez-Sánchez, Ángela, et al. "Three-dimensional printed model and virtual reconstruction: an extra tool for pediatric solid tumors surgery." European journal of pediatric surgery reports 6.01 (2018): e70-e76.

Kwon, Chang-Il, et al. "Production of ERCP training model using a 3D printing technique (with video)." BMC gastroenterology 20 (2020): 1-9.

Martelli, Nicolas, et al. "Advantages and disadvantages of 3-dimensional printing in surgery: a systematic review." Surgery 159.6 (2016): 1485-1500

Licenciamiento

Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional. (CC BY-NC)