

Metodología empírica para la evaluación a priori de la factibilidad de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas

Empiric methodology for the a priori evaluation of the feasibility of three-dimensional digital technologies for biomedical applications

Teresa Pérez Sosa, Ramón Quiza, Marcelino Rivas Santana

Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), Universidad de Matanzas. Autopista a Varadero km 3½, Matanzas 44740, Cuba.

*Autor de correspondencia: teresa.perez@umcc.cu

Resumen

La fabricación aditiva de componentes biomédicos, es un proceso productivo de alto valor agregado, donde el valor de los productos está dado, fundamentalmente, por el conocimiento y las habilidades que permiten lograrlo, y no en los recursos y materiales utilizados. Para evaluar la factibilidad de desarrollar un proyecto encaminado a soluciones basadas en tecnologías digitales tridimensionales para el sector biomédico, se hace necesario realizar un análisis económico preliminar, teniendo en consideración los dos aspectos fundamentales en la utilización, como servicio, de las tecnologías digitales tridimensionales: la estimación de los tiempos de elaboración y estimación de los costos. Con este propósito, la presente investigación propone una metodología que permite evaluar a priori la factibilidad de la aplicación de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas. Se presenta, además, un modelo de regresión lineal que permite predecir el tiempo de elaboración a partir de los factores que influyen significativamente sobre él, como son la experticia del trabajador, así como la geometría y la complejidad de la pieza.

Palabras clave: sector biomédico, fabricación aditiva, análisis de factibilidad.

Abstract

Additive manufacturing of biomedical components is a manufacturing process with high added value, where the value of the products is given, fundamentally, by the knowledge and skills that allow it to be achieved, and not by the resources and materials used. In order to evaluate the feasibility of developing a project for developing three-dimensional digital technologies-based solutions for the biomedical sector, it is necessary to carry out a preliminary economic analysis, taking into account the two fundamental aspects in the use, as a services, of three-dimensional digital technologies: estimation of processing times and estimation of costs. For this purpose, the present research proposes a methodology that allows to evaluate a priori the feasibility of the application of three-dimensional digital technologies for biomedical applications. A linear regression model is also presented for predicting the processing time from the factors that significantly influence it, such as the worker expertise, as well as the part geometry and complexity.

Keywords: biomedical sector, additive manufacturing, feasibility analysis.

1. Introducción

La introducción de las cada vez más complejas y potentes tecnologías de la información, están causando una transformación digital en toda la actividad humana, especialmente, en los procesos productivos y de los servicios [1, 2].

Las tecnologías digitales tridimensionales, incluyen la modelación y procesamiento de modelos geométricos tridimensionales digitales [3], el escaneado digital tridimensional [4] y la impresión tridimensional (o manufactura aditiva) [5]. Dentro del sector de las ciencias biomédicas, según la literatura consultada, las tecnologías digitales tridimensionales tienen aplicaciones potenciales en campos como la fabricación de prótesis (tanto externas como internas) [6, 7], la creación de maquetas y modelos docentes [8], la elaboración de piezas de repuesto, entre otros [9, 10].

Debido al costo que implica la implementación de un proyecto donde se emplee la fabricación aditiva, resulta de vital importancia realizar el análisis económico preliminar para conocer los posibles costos e ingresos que se puede obtener, el mismo permitirá determinar si es factible desarrollar económicamente el proyecto. Para ello se formalizaron las tecnologías digitales tridimensionales (modelación, escaneado e impresión), lo cual se ha complementado con el desarrollo de un grupo de estudios de caso, dirigidos a la solución de problemas reales del sector biomédico [11]. En este sentido, para la formalización de la metodología de la evaluación a priori de la factibilidad de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas, se han realizado un grupo de estudios dirigidos a la evaluación económica de los procesos, y a otros estudios de caso [12].

Por lo tanto, se plantea como objetivo de la presente investigación realizar una estimación de los tiempos de elaboración de modelos tridimensionales para la evaluación a priori de la factibilidad de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas. La misma se realizará de forma empírica, a partir de datos empíricos y teniendo en cuenta los diversos factores que intervienen en el mismo, los cuales permitirán obtener un modelo de regresión lineal para realizar predicciones respecto al tiempo.

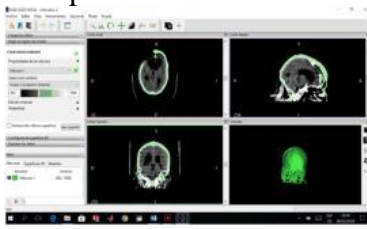
2. Materiales y Métodos

Con el propósito de realizar una identificación preliminar de las necesidades de aplicación de las tecnologías digitales tridimensionales en el sector biomédico, se llevaron a cabo un grupo de entrevistas a personal médico de diversas especialidades, que incluyó, entre otros, a ortopedicos, neurólogos, oncólogos y cirujanos, así como a personal técnico de electromedicina. A través de las mismas, se identificaron tres áreas fundamentales con demanda potencial para la aplicación de las tecnologías digitales.

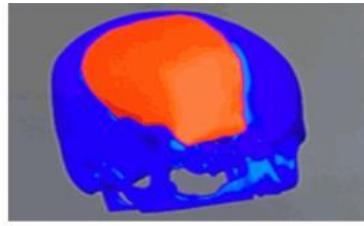
En primer lugar, se tiene la fabricación de prótesis (tanto externas como internas) y aditamentos personalizados. En la misma, se combinan un grupo de técnicas que incluyen el escaneado, el procesamiento digital de modelos e imágenes tridimensionales y la fabricación aditiva (impresión 3d) (ver Fig. 1). La fabricación de este tipo de elementos tiene múltiples ventajas tanto para el paciente, en términos de estética, comodidad y reducción de riesgos, como para la institución médica, al reducir notablemente los tiempos de intervención quirúrgica, con el consecuente impacto económico.

Una segunda demanda identificada, está en el diseño y fabricación de dispositivos partes y componentes, lo cual incluye tanto dispositivos concebidos completamente con un propósito específico (ver Fig. 2a), como partes y piezas de repuesto, fabricadas mediante técnicas de ingeniería

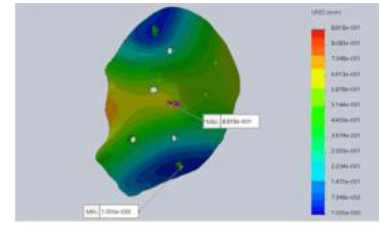
inversa (ver Fig. 2b). En ambos casos, se utilizan herramientas como la modelación, el escaneado y la impresión tridimensionales.



a) Preprocesamiento de la imagen de TAC



b) Modelación 3D del cráneo y la prótesis



c) Análisis de la resistencia mecánica de la prótesis



d) Impresión 3D de la plantilla de la prótesis



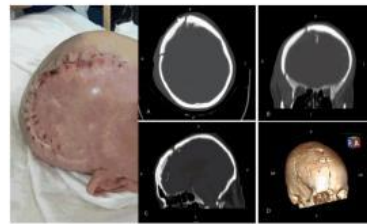
e) Fabricación del molde de la prótesis



f) Fabricación de la prótesis



g) Operación para el implante de la prótesis



h) Resultados del implante de la prótesis

Fig.1 Ejemplo de fabricación e implante de una prótesis personalizada

Dentro de este grupo, también se encuentran reproducciones de órganos y partes del cuerpo humano que pueden ser utilizados tanto con fines docentes como en la concepción y planificación de operaciones quirúrgicas. Estas reproducciones se fabrican, mediante impresión tridimensional, a partir de modelos obtenidos por escaneado tridimensional o por procesamiento de imágenes médicas, tales como las obtenidas mediante tomografías axiales computarizadas.

La tercera demanda identificada, es el uso de técnicas de análisis de imágenes y modelos tridimensionales, para realizar diagnósticos médicos (ver Fig. 3). Las mismas, a través del uso de herramientas de inteligencia artificial, tales como las redes neuronales artificiales, pueden identificar rasgos presentes en las imágenes obtenidas por diversos equipos médicos, o los modelos tridimensionales generados a partir de ellas.



Fig.2 Ejemplos de dispositivos, partes y componentes biomédicos fabricados con tecnologías digitales tridimensionales

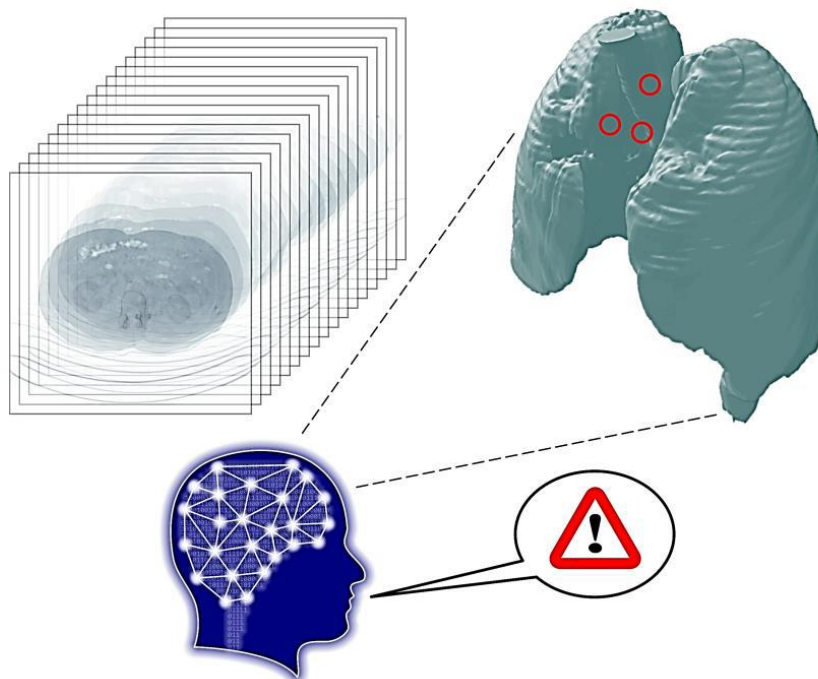


Fig.3 Representación gráfica de un diagnóstico realizado por procesamiento de imágenes tridimensional

A partir de las necesidades anteriores, se hace necesario diseñar una metodología para la evaluación a priori de la factibilidad de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas. El diseño de las tecnologías digitales tridimensionales, con el objetivo de su prestación como servicios, se basa en dos aspectos fundamentales: estimación de los tiempos de elaboración y estimación de los costos.

Para la estimación de los tiempos de modelado, escaneado e impresión 3D, se tomaron un grupo de casos de estudio. Los mismos se ejecutaron por tres usuarios, con niveles de experticia bajo (novato), medio (entrenado) y alto (experto), los cuales están dados según la experiencia del operario. Además se tuvo en cuenta la naturaleza de la geometría y la complejidad del elemento a escanear, modelar y/o imprimir. Considerando en cada caso los aspectos que influyen en los tiempos de cada elemento (ver Tablas 1-3).

Tabla 1: Datos de las variables experticia, geometría, complejidad y tiempo, para la modelación 3D.

| Casos de uso | Experticia | Geometría | Complejidad | Experticia | Geometría | Complejidad | Tiempo[h] |
|------------------------------------|------------|-----------|-------------|------------|-----------|-------------|-----------|
| Prótesis de cráneo | Novato | Compleja | Alta | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 19,5 |
| Prótesis de mano (falanges) | Novato | Simple | Media | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 9,0 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Novato | Media | Media | 0,0 | 0,5 | 0,5 | 16,5 |
| Prótesis de mano (acople) | Novato | Simple | Media | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 9,3 |
| Careta de protección | Novato | Simple | Media | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 11,2 |
| Splitter (tres vías) | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,0 |
| Splitter (cuatro vías) | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2,7 |
| Portajeringa (cuerpo) | Novato | Simple | Media | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 15,0 |
| Portajeringa (gatillo) | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 6,0 |
| Portajeringa (soporte) | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4,5 |
| Oclusor ocular | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,5 |
| Plantilla craneal | Novato | Compleja | Alta | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 18,0 |
| Palanqueta para gasómetro | Novato | Simple | Baja | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 3,0 |
| Placa para dermoexpansor | Novato | Simple | Media | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 6,7 |
| Espejuelos infantiles | Novato | Media | Alta | 0,0 | 0,5 | 1,0 | 15,4 |
| Prótesis de cráneo | Entrenado | Compleja | Alta | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 14,9 |
| Prótesis de mano (falanges) | Entrenado | Simple | Media | 0,5 | 0,0 | 0,5 | 3,8 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Entrenado | Media | Media | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 6,1 |
| Prótesis de mano (acople) | Entrenado | Simple | Media | 0,5 | 0,0 | 0,5 | 2,0 |
| Careta de protección | Entrenado | Simple | Media | 0,5 | 0,0 | 0,5 | 2,8 |
| Splitter (tres vías) | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 0,9 |
| Splitter (cuatro vías) | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 1,6 |
| Portajeringa (cuerpo) | Entrenado | Simple | Media | 0,5 | 0,0 | 0,5 | 3,1 |
| Portajeringa (gatillo) | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 1,6 |
| Portajeringa (soporte) | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 1,1 |
| Oclusor ocular | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 1,0 |
| Plantilla craneal | Entrenado | Compleja | Alta | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 10,9 |

| | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------|----------|-------|-----|-----|-----|------|
| Palanqueta para gasómetro | Entrenado | Simple | Baja | 0,5 | 0,0 | 0,0 | 2,4 |
| Placa para dermoexpansor | Entrenado | Simple | Media | 0,5 | 0,0 | 0,5 | 3,7 |
| Espejuelos infantiles | Entrenado | Media | Alta | 0,5 | 0,5 | 1,0 | 10,4 |
| Prótesis de cráneo | Experto | Compleja | Alta | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 7,6 |
| Prótesis de mano (falanges) | Experto | Simple | Media | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1,8 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Experto | Media | Media | 1,0 | 0,5 | 0,5 | 2,8 |
| Prótesis de mano (acople) | Experto | Simple | Media | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1,3 |
| Careta de protección | Experto | Simple | Media | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1,9 |
| Splitter (tres vías) | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 |
| Splitter (cuatro vías) | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 |
| Portajeringa (cuerpo) | Experto | Simple | Media | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1,5 |
| Portajeringa (gatillo) | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,9 |
| Portajeringa (soporte) | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 |
| Oclusor ocular | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,6 |
| Plantilla craneal | Experto | Compleja | Alta | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 6,3 |
| Palanqueta para gasómetro | Experto | Simple | Baja | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 1,0 |
| Placa para dermoexpansor | Experto | Simple | Media | 1,0 | 0,0 | 0,5 | 1,8 |
| Espejuelos infantiles | Experto | Media | Alta | 1,0 | 0,5 | 1,0 | 5,7 |

Tabla 2: Datos de las variables experticia, geometría y tiempo, para el escaneado 3D.

| Casos de uso | Experticia | Geometría | Experticia | Geometría | Tiempo [h] |
|---------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Palanqueta para gasómetro | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,50 |
| Espejuelos infantiles | Novato | Media | 0,0 | 0,5 | 1,25 |
| Protesis de cadera | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 1,75 |
| Fémur | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 2,25 |
| Modelo bucal | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 2,00 |
| Conector de refrigerante | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Palanqueta para gasómetro | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 1,00 |
| Espejuelos infantiles | Entrenado | Media | 0,5 | 0,5 | 1,75 |
| Protesis de cadera | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 1,75 |
| Fémur | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 2,50 |
| Modelo bucal | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 3,00 |
| Conector de refrigerante | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 1,25 |
| Palanqueta para gasómetro | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 1,50 |
| Espejuelos infantiles | Experto | Media | 1,0 | 0,5 | 1,50 |
| Protesis de cadera | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 2,50 |
| Fémur | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 2,50 |
| Modelo bucal | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 2,50 |
| Conector de refrigerante | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 1,50 |

Tabla 3: Datos de las variables experticia, complejidad y tiempo, para la impresión 3D.

| Caso de Estudio | Experticia | Complejidad | Experticia | Complejidad | Tiempo [h] |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Prótesis de cráneo | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 1,00 |
| Prótesis de mano (falanges) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Novato | Media | 0,0 | 0,5 | 1,00 |
| Prótesis de mano (acople) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Careta de protección | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Splitter (tres vías) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Splitter (cuatro vías) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Portajeringa (cuerpo) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Portajeringa (gatillo) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Portajeringa (soporte) | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Oclusor ocular | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Plantilla craneal | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 2,50 |
| Palanqueta para gasómetro | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Placa para dermoexpansor | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 0,75 |
| Espejuelos infantiles | Novato | Media | 0,0 | 0,5 | 2,00 |
| Protesis de cadera | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 2,00 |
| Fémur | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 1,50 |
| Modelo bucal | Novato | Compleja | 0,0 | 1,0 | 1,50 |
| Conector de refrigerante | Novato | Simple | 0,0 | 0,0 | 1,00 |
| Prótesis de cráneo | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 1,75 |
| Prótesis de mano (falanges) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Entrenado | Media | 0,5 | 0,5 | 0,75 |
| Prótesis de mano (acople) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Careta de protección | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Splitter (tres vías) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,75 |
| Splitter (cuatro vías) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,75 |
| Portajeringa (cuerpo) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Portajeringa (gatillo) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,75 |
| Portajeringa (soporte) | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Oclusor ocular | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Plantilla craneal | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 2,00 |
| Palanqueta para gasómetro | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Placa para dermoexpansor | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Espejuelos infantiles | Entrenado | Media | 0,5 | 0,5 | 1,50 |
| Protesis de cadera | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 1,50 |
| Fémur | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 1,50 |
| Modelo bucal | Entrenado | Compleja | 0,5 | 1,0 | 1,00 |
| Conector de refrigerante | Entrenado | Simple | 0,5 | 0,0 | 0,50 |
| Prótesis de cráneo | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 1,50 |
| Prótesis de mano (falanges) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,25 |
| Prótesis de mano (carpo-metacarpo) | Experto | Media | 1,0 | 0,5 | 0,75 |
| Prótesis de mano (acople) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,25 |
| Careta de protección | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Splitter (tres vías) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Splitter (cuatro vías) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |

| | | | | | |
|---------------------------|---------|----------|-----|-----|------|
| Portajeringa (cuerpo) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Portajeringa (gatillo) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Portajeringa (soporte) | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Ocluser ocular | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Plantilla craneal | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 1,50 |
| Palanqueta para gasómetro | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Placa para dermoexpansor | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,50 |
| Espejuelos infantiles | Experto | Media | 1,0 | 0,5 | 1,00 |
| Protesis de cadera | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 1,00 |
| Fémur | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 1,00 |
| Modelo bucal | Experto | Compleja | 1,0 | 1,0 | 1,00 |
| Conector de refrigerante | Experto | Simple | 1,0 | 0,0 | 0,25 |

3. Resultados y Discusión

Los datos alcanzados mediante el escaneo, modelación y/o impresión tridimensional durante la realización de los casos de usos permitieron obtener los modelos de regresión correspondientes, con los cuales se hizo posible realizar una predicción estimada del valor del tiempo en cada caso, como se muestra a continuación.

3.1. Modelos de regresión

Para la obtención de los valores de los parámetros de los modelos de regresión lineal en estudio, así como los valores de los estadígrafos correspondientes, para comprobar su validez y fiabilidad se empleó el software Eviews 13.

3.1.1. Modelo de regresión para la modelación tridimensional

El modelo de regresión lineal obtenido relaciona la variable dependiente tiempo de modelado (T_M) con las variables independientes experticia (E), geometría (G) y complejidad (C), obteniendo la ecuación:

$$T_M = 5,58 - 7,14 E + 5,12 G + 5,95 C. \quad (1)$$

Al analizar el valor de F-statistic=67,44, con una probabilidad de 0,00, menor que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$ muestra que alguna de las variables, experticia, geometría o complejidad, tienen influencia significativa sobre el tiempo.

Al analizar las pruebas t-Statistic, se comprueba que todos los valores de probabilidad son menores que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$, por lo cual las tres variables independientes experticia, geometría y complejidad ejercen influencia significativa sobre la variable dependiente, tiempo.

La relación de la experticia con el tiempo es inversa, mientras que la relación de la geometría y la complejidad con el tiempo es directa.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0,83$ es elevado, el cual demuestra que el 83% de la variabilidad del tiempo de modelación, se explica por la influencia que tienen sobre él la experticia, la geometría y la complejidad.

3.1.2. Modelo de regresión para el escaneado tridimensional

El modelo de regresión lineal obtenido relaciona la variable dependiente tiempo de escaneado (T_E) con las variables independientes experticia (E) y geometría (G), obteniendo la ecuación:

$$T_E = 0,81 - 0,04 E + 1,40 G. \quad (2)$$

Al analizar el valor de F-statistic = 17,01, con una probabilidad de 0,00, menor que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$ muestra que alguna de las variables, experticia o geometría, tienen influencia significativa sobre el tiempo.

Al analizar las pruebas t-Statistic, se comprueba que todos los valores de probabilidad son menores que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$, por lo cual ambas variables independientes experticia y geometría ejercen influencia significativa sobre la variable dependiente, tiempo.

La relación de la experticia con el tiempo es inversa, mientras que la relación de la geometría con el tiempo es directa.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0,69$ es elevado, el cual demuestra que el 69% de la variabilidad del tiempo de escaneado, se explica por la influencia que tienen sobre él la experticia y la geometría.

3.1.3. Modelo de regresión para la impresión tridimensional

El modelo de regresión lineal obtenido relaciona la variable dependiente tiempo de impresión (T_I) con las variables independientes experticia (E) y complejidad (C), obteniendo la ecuación:

$$T_I = 0,88 - 0,48 E + 0,86 C. \quad (3)$$

Al analizar el valor de F-statistic=76,42, con una probabilidad de 0,00, menor que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$ muestra que alguna de las variables, experticia o complejidad, tienen influencia significativa sobre el tiempo.

Al analizar las pruebas t-Statistic, se comprueba que todos los valores de probabilidad son menores que el nivel de significación de $\alpha = 0,05$, por lo cual ambas variables independientes experticia y complejidad ejercen influencia significativa sobre la variable dependiente, tiempo. La relación de la experticia con el tiempo es inversa, mientras que la relación de la complejidad con el tiempo es directa.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0,73$ es elevado, el cual demuestra que el 73% de la variabilidad del tiempo de impresión, se explica por la influencia que tienen sobre él la experticia y la complejidad.

3.2. Formalización de la metodología de estimación de costos

3.2.1. Cálculo de los tiempos

Para la estimación de los costos en las tecnologías digitales tridimensionales, los tiempos de elaboración juegan un papel fundamental. En la metodología propuesta, los tiempos de elaboración, para la modelación tridimensional (T_M) el escaneado (T_E) y de impresión (T_I) se estiman mediante las ecuaciones (1), (2) y (3), en dependencia de la geometría, G , y complejidad (C) del elemento y la experticia (E) del operario.

3.2.2. Cálculo de los costos

Modelación tridimensional

En la modelación tridimensional, el costo total de la operación, Z_M , se puede desglosar en costo de mano de obra, Z_{ML} ; costo de electricidad, Z_{ME} ; costo de amortización, Z_{MM} ; y costos indirectos, Z_{MI} :

$$Z_M = Z_{ML} + Z_{ME} + Z_{MM} + Z_{MI} \quad (4)$$

El costo de mano de obra se calcula como:

$$Z_{ML} = T_M \lambda_M; \quad (5)$$

donde λ_M es el salario horario del operario que realiza la modelación. El costo de electricidad, por otro lado, se determina como:

$$Z_{ME} = T_M E_M \varepsilon; \quad (6)$$

donde E_M es el consumo de los equipos utilizados en la modelación; y ε es el precio medio de la electricidad. Por su parte, el costo de amortización se calcula como:

$$Z_{MM} = T_M \sum i (\zeta_{M(i)} / \Lambda_{M(i)}); \quad (7)$$

siendo $\zeta_{M(i)}$ y $\Lambda_{M(i)}$ el costo y el tiempo de vida útil, respectivamente, del i -ésimo equipo utilizado en la modelación. Finalmente, el costo indirecto se calcula como:

$$Z_{MI} = T_M \varphi_M; \quad (8)$$

donde φ_M es el coeficiente de costos indirectos, determinado para la entidad que realiza la modelación.

Impresión tridimensional

Los costos de la impresión tridimensional, Z_P , se desglosan en costo de mano de obra, Z_{PL} ; costo de alambre de impresión, Z_{PW} ; costo de electricidad, Z_{PE} ; costo de amortización, Z_{PM} ; y costos indirectos, Z_{PI} :

$$Z_P = Z_{PL} + Z_{PW} + Z_{PE} + Z_{PM} + Z_{PI} \quad (9)$$

El costo de mano de obra se calcula como:

$$Z_{PL} = (T_{PD} + \psi T_{PM}) \lambda_P \quad (16)$$

donde λ_P es el salario horario del operario que realiza la impresión, y ψ ($\psi = 0,1 \dots 0,2$) es la fracción de tiempo dedicada al control del proceso de impresión. El costo de alambre, por su lado, se calcula como:

$$Z_{PW} = \xi V \rho \omega; \quad (10)$$

donde ξ es el factor de relleno previsto; V es el volumen estimado del elemento a imprimir; ρ es la densidad del material de impresión (para el PLA, $\rho \approx 1,24 \text{ g/cm}^3$); y ω es el costo, por unidad de masa, dicho material. El costo de electricidad de determina como:

$$Z_{PE} = (T_{PT}E_{PT} + T_{PM}E_{PM})\varepsilon; \quad (11)$$

siendo E_{PT} y E_{PM} son los consumos eléctricos de los equipos utilizados en el diseño tecnológico y en la fabricación, respectivamente; y ε es el precio de la electricidad.

Por su parte, el costo de amortización se calcula teniendo en cuenta tanto los equipos para el diseño tecnológico como para la fabricación:

$$Z_{PM} = T_{PT} \Sigma i(\zeta_{PT(i)}/\Lambda_{PT(i)}) + T_{PM} \Sigma i(\zeta_{PM(i)}/\Lambda_{PM(i)}); \quad (12)$$

donde $\zeta_{PT(i)}$ y $\zeta_{PM(i)}$ son los costos de los equipos para diseño tecnológico y para fabricación, mientras que $\Lambda_{PT(i)}$ y $\Lambda_{PM(i)}$ son las respectivas vidas útiles. De forma similar a la modelación, en la impresión el costo indirecto se calcula como:

$$Z_{PI} = (T_{PT} + T_{PM})\varphi_P; \quad (13)$$

donde φ_P es el coeficiente de costos indirectos, determinado para la entidad que realiza la impresión.

Escaneado tridimensional

En el escaneado tridimensional, el costo del proceso, Z_S , se desglosa en costo de mano de obra, Z_{SL} ; costo de electricidad, Z_{SE} ; costo de amortización, Z_{SM} ; y costos indirectos, Z_{SI} :

$$Z_S = Z_{SL} + Z_{SE} + Z_{SM} + Z_{SI}; \quad (14)$$

El costo de mano de obra se calcula como:

$$Z_{SL} = T_S \lambda_S; \quad (15)$$

donde λ_S es el salario horario del operario que realiza el escaneado. El costo de electricidad de determina como:

$$Z_{SE} = (T_{SE}E_{SE} + T_{SP}E_{SP})\varepsilon; \quad (16)$$

siendo E_{SE} y E_{SP} son los consumos eléctricos de los equipos utilizados en el escaneado y en el post-procesamiento, respectivamente; y ε es el precio de la electricidad.

Por su parte, el costo de amortización se calcula teniendo en cuenta tanto los equipos para el escaneado como para el post-procesamiento:

$$Z_{SM} = T_{SE} \Sigma i(\zeta_{SE(i)}/\Lambda_{SE(i)}) + T_{SP} \Sigma i(\zeta_{SP(i)}/\Lambda_{SP(i)}); \quad (24)$$

donde $\zeta_{SE(i)}$ y $\zeta_{SP(i)}$ son los costos de los equipos para el escaneado y para el post-procesamiento, mientras que $\Lambda_{SE(i)}$ y $\Lambda_{SP(i)}$ son las respectivas vidas útiles. A igual que para las otras operaciones, en el escaneado el costo indirecto se calcula como:

$$Z_{SM} = T_S \varphi_S; \quad (25)$$

donde φ_s es el coeficiente de costos indirectos, determinado para la entidad que realiza el escaneado.

4. Conclusiones

Se identificaron como principales necesidades de aplicación de las tecnologías digitales tridimensionales en el sector de la salud, la fabricación de prótesis y aditamentos personalizados; el diseño y la fabricación de dispositivos partes y componentes; y el diagnóstico a partir modelos e imágenes utilizando herramientas de inteligencia artificial. Las principales técnicas digitales tridimensionales aplicables al sector biomédico son la modelación geométrica, el escaneado y la impresión. Se desarrolló una metodología para la evaluación preliminar de tiempos, gastos y costos, de las tecnologías digitales tridimensionales a ofertar, como servicios, en el sector biomédico, lo cual es un requisito para su transferencia tecnológica. Se obtuvo un modelo de regresión lineal, el cual permite a través de los valores de los factores experticia, geometría y complejidad predecir valores sobre el tiempo de elaboración y así evaluar a priori de la factibilidad de las tecnologías digitales tridimensionales para aplicaciones biomédicas.

Referencias

1. Danuso, A., Giones, F., Ribeiro da Silva, E., *The digital transformation of industrial players: A guide*, Business Horizons, 2021. 65(3): 341-349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.04.001>
2. Buck, C., Clarke, J., Torres de Oliveira, R., Desouza, K.C., Maroufkhani, P. *Digital transformation in asset-intensive organisations: The light and the dark side*. Journal of Innovation and Knowledge, 2023. 8(2): 100335, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jik.2023.100335>
3. Nie, J., Zhang, T., Li, T., Yu, S., Li, X., Wei, Z. *Image-based 3D model retrieval via disentangled feature learning and enhanced semantic alignment*. Information Processing and Management, 2023. 60(2): 103159, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ipm.2022.103159>
4. Liu, C.-S., Lin, J.-J., Chen, B.-R. *A novel 3D scanning technique for reflective metal surface based on HDR-like image from pseudo exposure image fusion method*. Optics and Lasers in Engineering, 2023. 168: 107688, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2023.107688>
5. Zhou, X., Ren, L., Song, Z., Li, G., Zhang, J., Li, B., Qian Wu, Q., Li, W., Ren, L., Liu, Q. *Advances in 3D/4D printing of mechanical metamaterials: From manufacturing to applications*. Composites Part B: Engineering, 2023. 254: 110585, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110585>
6. Das, A., Awasthi, P., Jain, V., Banerjee, S.S. *3D printing of maxillofacial prosthesis materials: Challenges and opportunities*. Bioprinting, 2023. 32: e00282, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2023.e00282>
7. Unkovskiy, A., Wahl, E., Huettig, F., Keutel, C., Spintzyk, S. *Multimaterial 3D printing of a definitive silicone auricular prosthesis: An improved technique*. The Journal of Prosthetic Dentistry, 2021. 125(6): 946-950, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2020.02.021>
8. Meng, M., Wang, J., Sun, T., Zhang, W., Zhang, J., Shu, L., Li, Z. *Clinical applications and prospects of 3D printing guide templates in orthopaedics*. Journal of Orthopaedic Translation, 2022. 34: 22-41, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jot.2022.03.001>
9. Beer, N., Hegger, I., Kaae, S., De Bruin, M.L., Genina, N., Alves, T.L., Hoebert, J., Sporrang, S.K. *Scenarios for 3D printing of personalized medicines - A case study*. Exploratory Research in Clinical and Social Pharmacy, 2021. 4: 100073, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rcsop.2021.100073>
10. Javaid, M., Haleem, A., Singh, R.P., Suman, R. *3D printing applications for healthcare research and development*. Global Health Journal, 2022. 6(4): 217-226, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.glohj.2022.11.001>

Agradecimientos

Los resultados de este artículo fueron financiados por el proyecto “Encadenamiento de soluciones basadas en tecnologías digitales tridimensionales para la enseñanza y la práctica de las ciencias biomédicas” (PT211MT003-004), asociado al Programa Territorial de Encadenamientos Productivos y Circuitos Cortos de Producción-Comercialización de Bienes y Servicios.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran no tener conocimiento de ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Teresa Pérez Sosa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5587-4624>

Participó en el diseño de la investigación, redacción, obtención de los Modelos de Regresión Lineal.

Ramón Quiza Sardiñas. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1293-6044>

Participó en la metodología declarada en la investigación, redacción y edición.

Marcelino Rivas Santana. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0305-515X>

Participó en la obtención de los datos, gestionó el vínculo con el sector biomédico, y en la validación de la metodología propuesta.