

Modelo computacional del proceso de impresión 3D por extrusión de constructos 3D complejos del material gelatina/siloxano

Marcos Bryan Valenzuela Reyes^{1*}, Carlos Alberto Martínez Perez¹, Esmeralda Sarai Zúñiga Aguilar¹.

¹ Departamento de Física y Matemáticas. Instituto de Ingeniería y Tecnología.
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.

Resumen

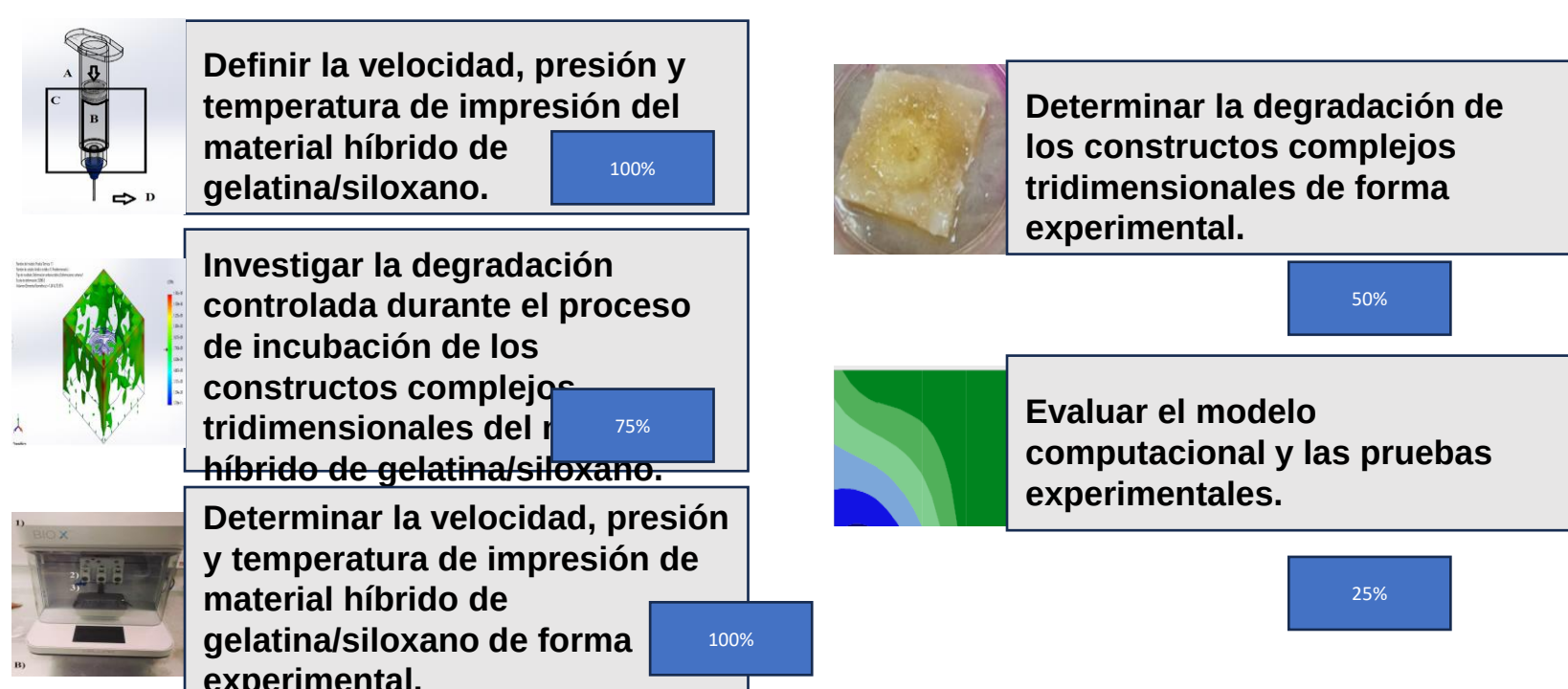
Los constructos 3D complejos fueron desarrollados como andamios para replicar tejidos sintéticos, utilizando una bioimpresora BIO X con un núcleo de válvulas cardíacas de gelatina/siloxano embebido en una matriz de sacrificio de gelatina/PEG. Se realizó una simulación multifásica mediante el método de elementos finitos (MEF) en SolidWorks para estudiar el comportamiento del sistema bajo condiciones de incubación (37 °C y 20 % de humedad). La simulación estimó una degradación del 55.95 % de masa y una deformación del 39.96 % en 21 días, centrada en la matriz. Experimentalmente, se confirmó la deformación, pero la pérdida de masa fue menor (30.94 wt%), lo cual se atribuyó a diferencias entre mediciones volumétricas y gravimétricas. El volumen del constructo aumentó a 7.6 ml, provocando el colapso de la matriz entre los días 22 y 23. El núcleo estructural se mantuvo intacto, mostrando degradación hidrolítica y térmica. Se observó una disminución del pH que favorece la proliferación celular. Además, se desarrolló una red neuronal convolucional binaria para optimizar los parámetros de impresión. El mejor desempeño (86 % de exactitud) se logró con 250 imágenes de entrenamiento y parámetros de impresión de 170 kPa, 10 mm/s y boquilla de 27 G. Esto demuestra el potencial para imprimir estructuras cardíacas más complejas.

Introducción:

La bioimpresión 3D ha emergido como una tecnología clave en la ingeniería de tejidos, permitiendo la fabricación precisa de constructos que imitan estructuras biológicas complejas. Estos andamios tridimensionales no solo deben replicar la forma de los órganos, sino también ofrecer un entorno propicio para la adhesión, proliferación y diferenciación celular. Para lograrlo, es fundamental controlar propiedades como la resistencia mecánica, la degradación programada y las condiciones fisicoquímicas internas durante procesos como la incubación. En esta investigación, se desarrollaron constructos 3D con geometría inspirada en válvulas cardíacas humanas, bioimpresos con un material híbrido de gelatina/siloxano embebido en una matriz de sacrificio de gelatina/PEG. A través de simulaciones multifísicas y pruebas experimentales, se evaluó su comportamiento estructural, degradativo y de pH durante incubación. Además, se implementó un modelo de aprendizaje automático para optimizar los parámetros de impresión con base en imágenes de constructos reales, mejorando la fidelidad respecto al diseño original. Los resultados obtenidos aportan evidencia del potencial de estos sistemas bioimpresos para aplicaciones en medicina regenerativa, destacando su viabilidad estructural y funcional en entornos biológicos simulados.

Objetivo general:

- Desarrollar un modelo computacional del proceso de bioimpresión por extrusión de constructos complejos tridimensionales del material híbrido de gelatina/siloxano.



Metodología:

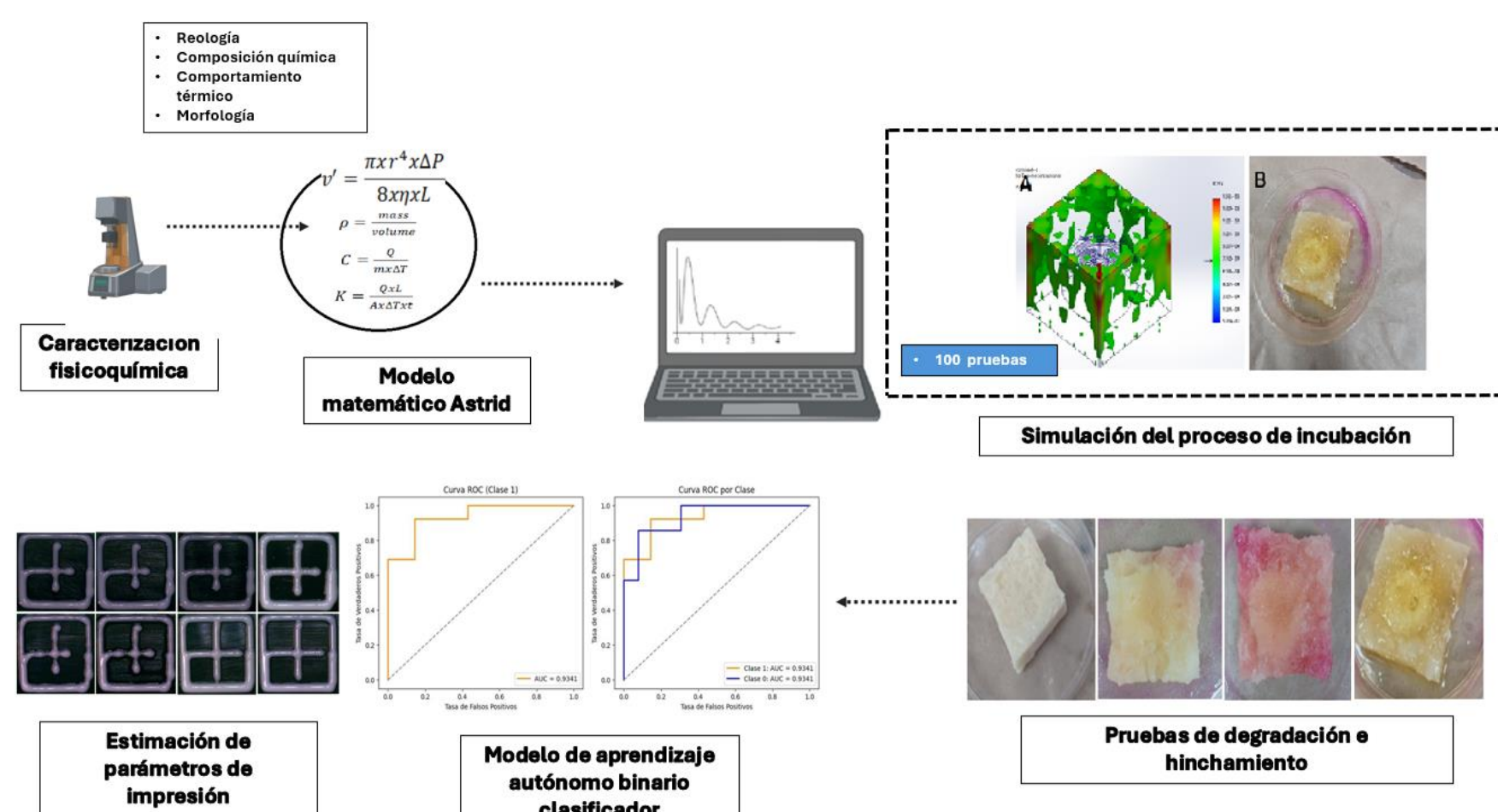


Figura 1. Metodología del proyecto.

Resultados:

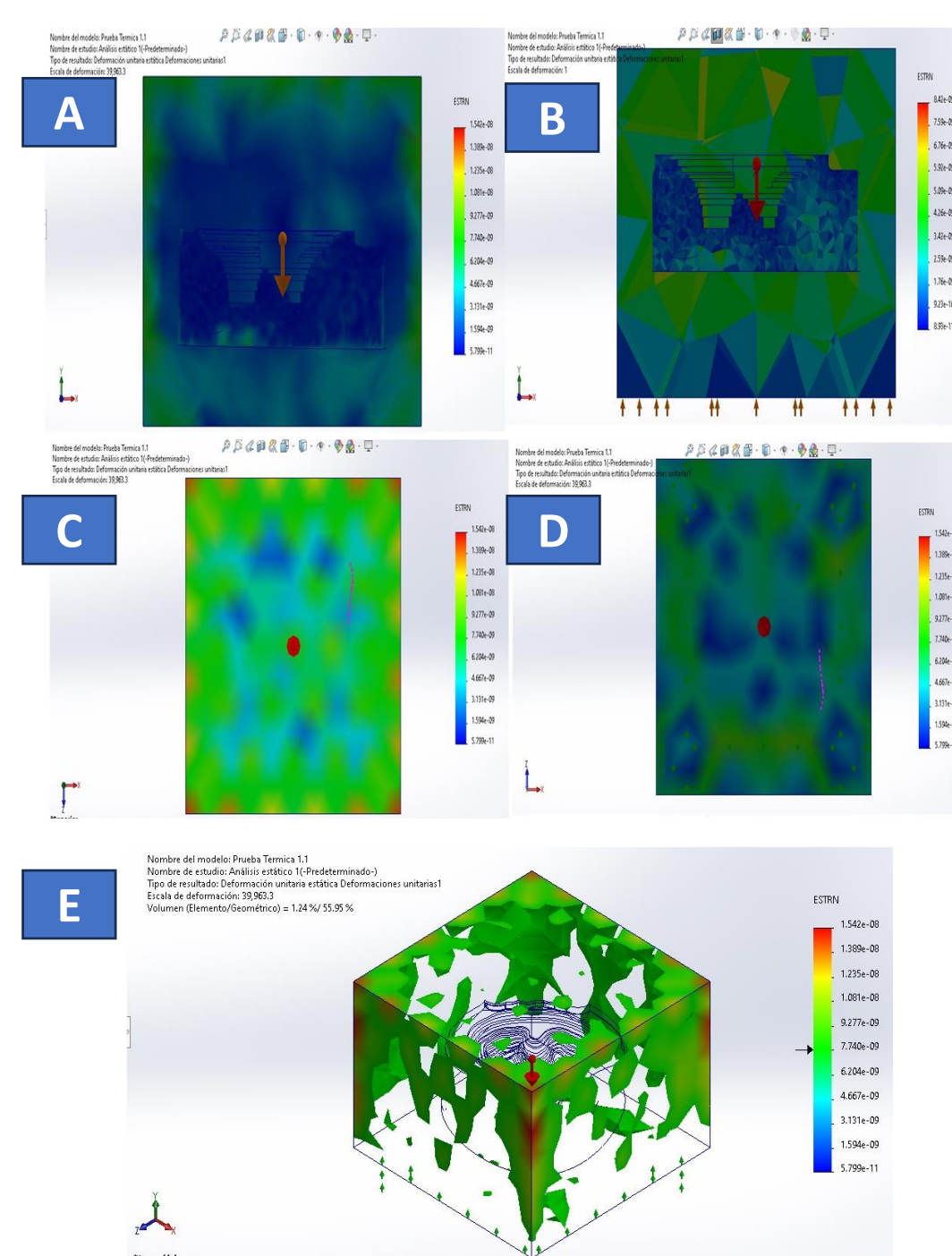


Figura 2. Simulación por MEF del proceso de incubación de los constructos 3D complejos.

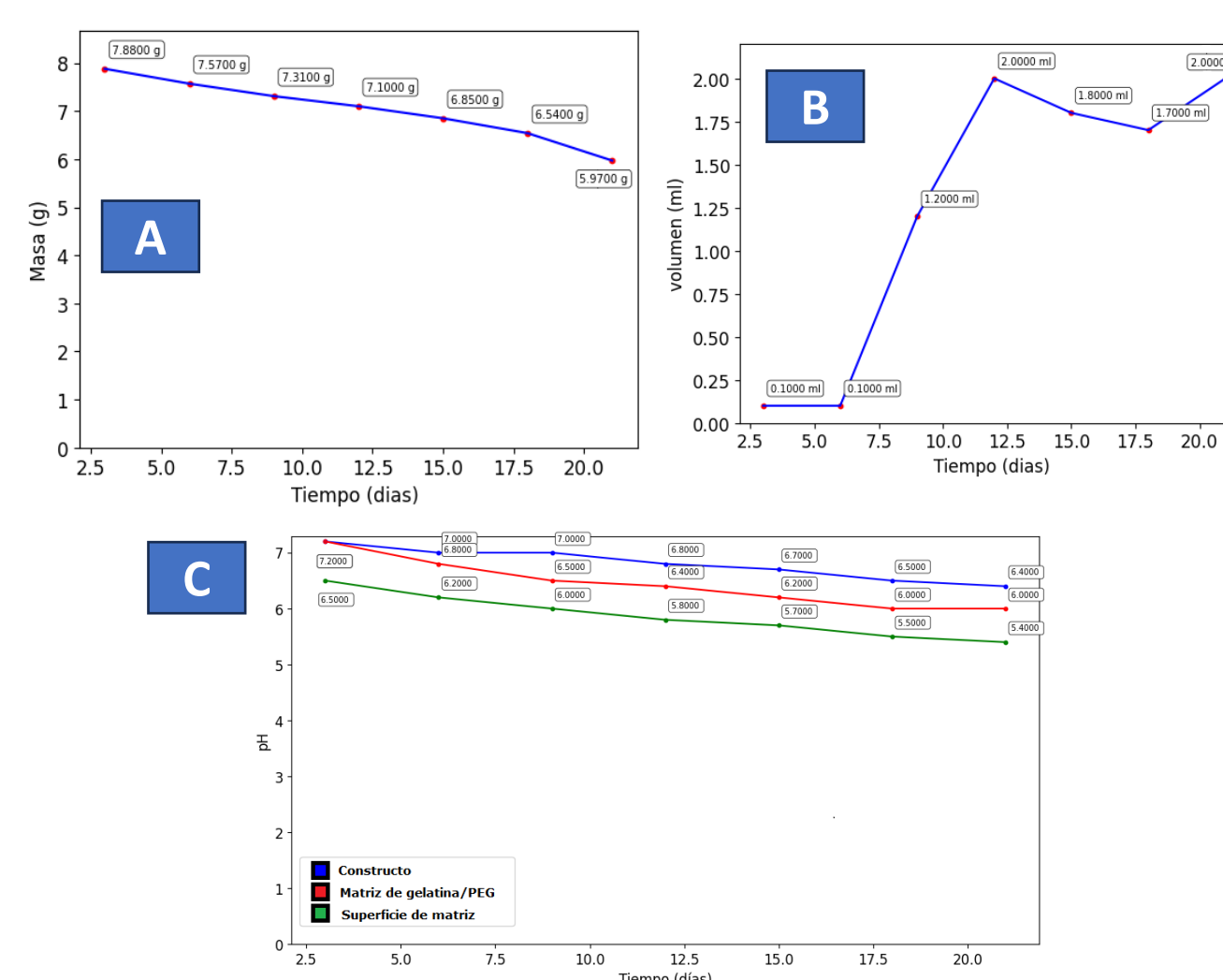


Figura 3. Pruebas de degradación e hinchamiento de los constructos 3D complejos.

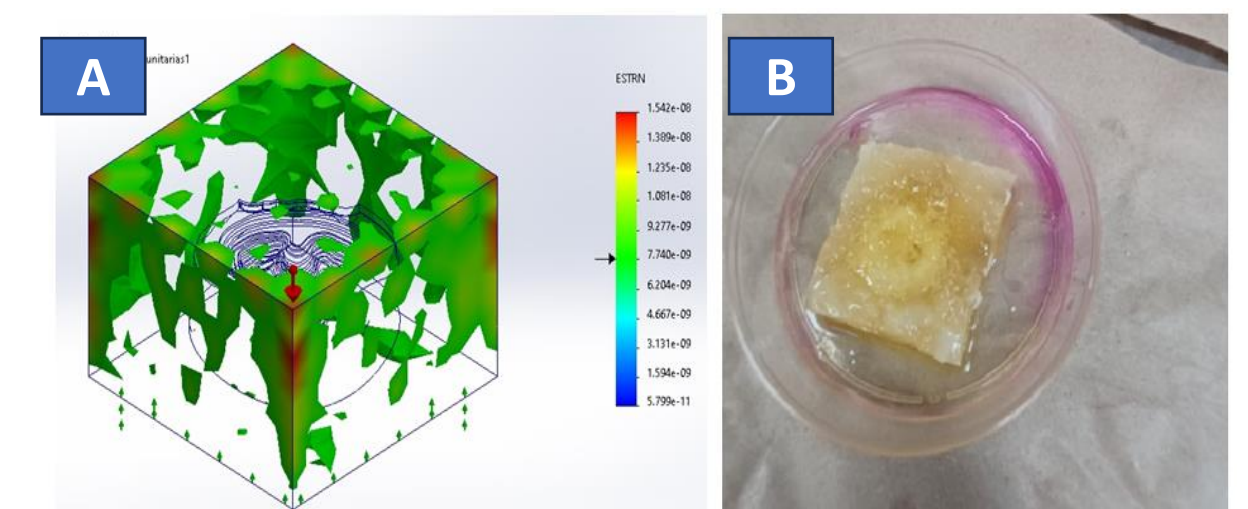


Figura 4. Comparativa entre la simulación y experimentación de la incubación de los constructos 3D complejos.

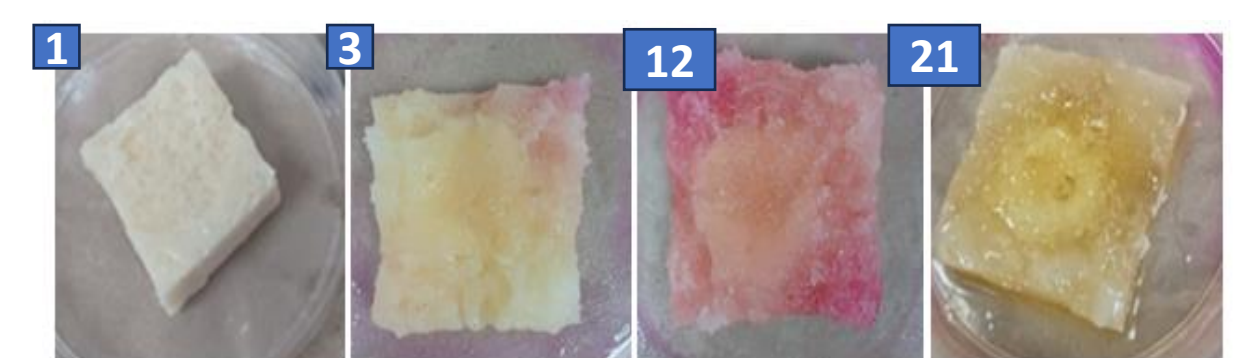


Figura 5. Pruebas de degradación e hinchamiento de los constructos 3D complejos.

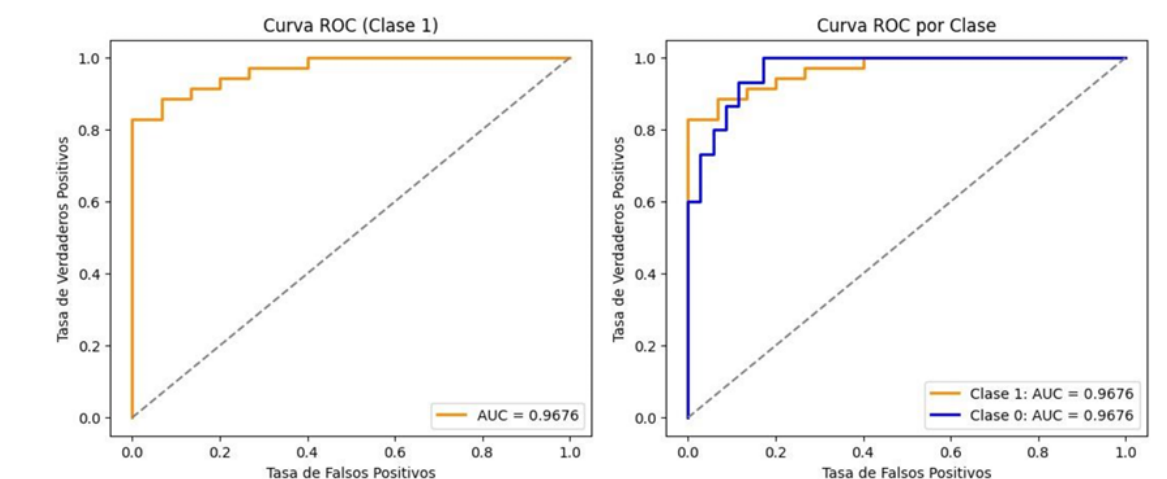


Figura 6. Métricas de evaluación del modelo de aprendizaje automático binario clasificador.

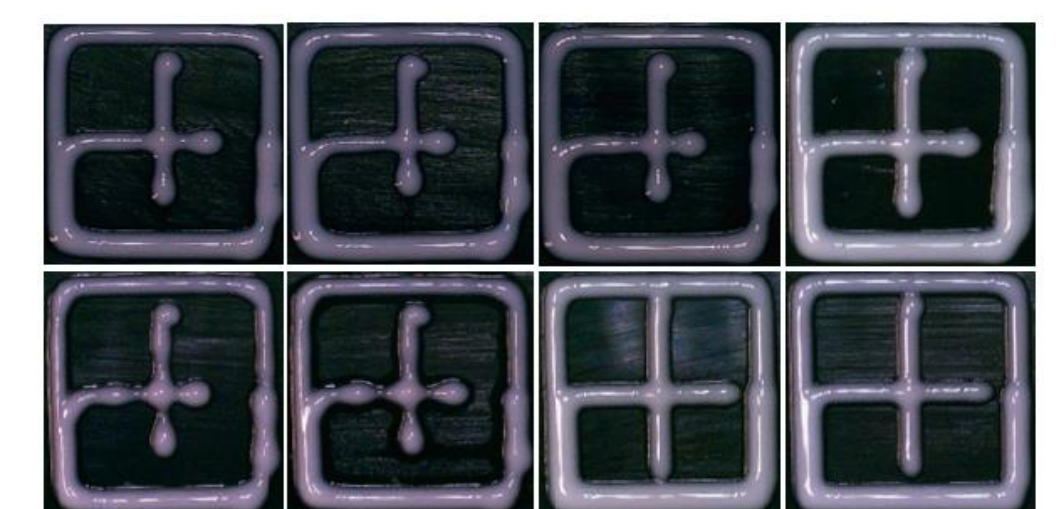


Figura 7. Parámetros estimados por el modelo de aprendizaje automático para la optimización del proceso de impresión.

Conclusiones:

- Viabilidad estructural y funcional de los constructos:** Los constructos bioimpresos mantuvieron su integridad estructural durante la incubación, demostrando su potencial como andamios viables para aplicaciones en ingeniería de tejidos cardíacos.
- Concordancia entre simulación y experimentación:** El modelo de simulación multifísica predijo con precisión la deformación de los constructos, aunque requiere ajustes para reducir discrepancias en la estimación de pérdida de masa.
- Optimización del proceso de impresión mediante IA:** El uso de redes neuronales convolucionales permitió optimizar los parámetros de impresión, mejorando la fidelidad de los constructos respecto al diseño original y habilitando la fabricación de estructuras más complejas.

Referencias:

- P. Wojciechowska et. al. "Gelatin – siloxane hybrid monoliths as novel heavy metal adsorbents", *Applied Sciences*, vol. 12(3), pp 1258, (2022).
- Kallivokas S. et al. "A combined Computational and Experimental Analysis of PLA and PCL Hybrid Nanocomposites 3D Printed Scaffolds for Bone Regeneration" *Biomedicine*, vol 12(2), 2020.
- Soufivand A. et al "Prediction of mechanical behavior of 3D bioprinted tissue-engineered scaffolds using finite element method (FEM) analysis" *Additive Manufacturing*, vol 33, 2020.
- J Shin et al. "Optimized 3D Bioprinting Technology Based on Machine Learning: A review of Recent Trends and Advances", *Micromachines*, vol. 13, p 363, 2022.