

## ÓRGÃOS IMPRESSOS, VIDAS SALVAS: A BIOMEDICINA 3D COMO UM NOVO CAMINHO EM TRANSPLANTES

### PRINTED ORGANS, SAVED LIVES: 3D BIOMEDICINE AS A NEW PATH IN TRANSPLANTS

### ÓRGANOS IMPRESOS, VIDAS SALVADAS: LA BIOMEDICINA 3D COMO NUEVO CAMINO EN TRASPLANTES

Kaique Juan Menezes Souza<sup>1</sup>  
Thianrri Matos Ribeiro<sup>2</sup>  
Heloísa Fernanda de Farias Silva Dias<sup>3</sup>  
Carinne Rodrigues Silva<sup>4</sup>  
Luciano de Oliveira Souza Tourinho<sup>5</sup>

**RESUMO:** O artigo busca revisar os avanços científicos da bioimpressão 3D na produção de órgãos funcionais, com a finalidade de entender os desafios e perspectivas como alternativa aos transplantes convencionais. Para tal, foi realizada uma revisão narrativa da literatura consultando bases de dados como PubMed, SciELO, LILACS e Google Scholar. Foram incluídos trabalhos publicados entre 2017 e 2025, em português e inglês, excluindo resumos, editoriais e pesquisas fora do escopo. A análise da literatura evidenciou que a bioimpressão 3D desponta como uma alternativa promissora, ao possibilitar a criação de tecidos e órgãos personalizados, reduzindo o risco de rejeição e ampliando as possibilidades terapêuticas. Técnicas como extrusão, jato de tinta e laser assistida têm avançado significativamente. Ademais, a bioimpressão contribui para testes farmacológicos e planejamento cirúrgico, fortalecendo a medicina regenerativa. Contudo, a vascularização inadequada permanece como principal obstáculo técnico, juntamente com questões éticas, regulatórias e econômicas que limitam sua aplicação clínica. Conclui-se que, apesar dos desafios, a bioimpressão 3D oferece perspectivas reais para reduzir as filas de espera por transplantes e minimizar rejeições, representando uma inovação com alto impacto na saúde pública. Investimentos contínuos em pesquisa e políticas públicas são essenciais para viabilizar sua aplicação terapêutica em larga escala.

1

**Palavras-chave:** Transplante de Órgãos. Impressão Tridimensional. Tecnologia Biomédica.

<sup>1</sup> Acadêmico - Afya Faculdade de Ciências Médicas de Itabuna.

<sup>2</sup> Acadêmico - Afya Faculdade de Ciências Médicas de Itabuna.

<sup>3</sup> Acadêmica - Afya Faculdade de Ciências Médicas de Itabuna.

<sup>4</sup> Acadêmica - Afya Faculdade de Ciências Médicas de Itabuna.

<sup>5</sup> Pós-Doutor em Direitos Humanos - Universidad de Salamanca - España - Orientador - Afya Faculdade de Ciências Médicas de Itabuna.

**ABSTRACT:** The article aimed to review the scientific advances in 3D bioprinting for the production of functional organs in order to understand the challenges and perspectives as an alternative to conventional transplants. To this end, a narrative literature review was conducted using databases such as PubMed, SciELO, LILACS, Web of Science, and Google Scholar. Published works between 2017 and 2025, in Portuguese and English, were included, excluding abstracts, editorials, and research outside the scope. The literature review showed that 3D bioprinting is emerging as a promising alternative, enabling the creation of personalized tissues and organs, reducing the risk of rejection and expanding therapeutic possibilities. Techniques such as extrusion, inkjet printing, and laser-assisted printing have advanced significantly. Furthermore, bioprinting contributes to pharmacological testing and surgical planning, strengthening regenerative medicine. However, inadequate vascularization remains the main technical obstacle, along with ethical, regulatory, and economic issues that limit its clinical application. In conclusion, despite the challenges, 3D bioprinting offers real prospects for reducing transplant waiting lists and minimizing rejections, representing an innovation with a high impact on public health. Continuous investment in research and public policies is essential to enable its large-scale therapeutic application.

**Keywords:** Organ Transplantation. Three-Dimensional printing. Biomedical Technology.

**RESUMEN:** El artículo tuvo como objetivo revisar los avances científicos en bioimpresión 3D para la producción de órganos funcionales con el fin de comprender los desafíos y las perspectivas como alternativa a los trasplantes convencionales. Para ello, se realizó una revisión narrativa de la literatura utilizando bases de datos como PubMed, SciELO, LILACS, Web of Science y Google Scholar. Se incluyeron trabajos publicados entre 2017 y 2025, en portugués e inglés, excluyendo resúmenes, editoriales e investigaciones fuera del alcance. La revisión de la literatura mostró que la bioimpresión 3D se perfila como una alternativa prometedora, que permite la creación de tejidos y órganos personalizados, reduce el riesgo de rechazo y amplía las posibilidades terapéuticas. Técnicas como la extrusión, la impresión por inyección de tinta y la impresión asistida por láser han avanzado significativamente. Además, la bioimpresión contribuye a las pruebas farmacológicas y la planificación quirúrgica, fortaleciendo la medicina regenerativa. Sin embargo, la vascularización inadecuada sigue siendo el principal obstáculo técnico, junto con cuestiones éticas, regulatorias y económicas que limitan su aplicación clínica. En conclusión, a pesar de los desafíos, la bioimpresión 3D ofrece perspectivas reales para reducir las listas de espera de trasplantes y minimizar los rechazos, lo que representa una innovación con un gran impacto en la salud pública. La inversión continua en investigación y políticas públicas es esencial para posibilitar su aplicación terapéutica a gran escala.

**Palabras clave:** Trasplante de Órganos. Impresión Tridimensional. Tecnología Biomédica.

## INTRODUÇÃO

A escassez de órgãos para transplante permanece como um dos desafios mais críticos da saúde pública contemporânea, refletindo um desequilíbrio estrutural entre a crescente demanda por órgãos e a limitada disponibilidade de doadores. De acordo com a Organização Mundial da Saúde, aproximadamente dez indivíduos morrem a cada hora em decorrência da indisponibilidade de órgãos para transplante (OMS, 2020), evidenciando a magnitude global do

problema. No Brasil, dados oficiais indicam que, em 2025, mais de 41 mil pacientes aguardavam transplantes de órgãos sólidos, número que ultrapassa 68 mil quando incluída a demanda por córneas (BRASIL, 2025). Esses dados demonstram que, apesar do fortalecimento dos programas públicos de transplantes, os mecanismos tradicionais baseados exclusivamente na ampliação da captação de doadores têm se mostrado insuficientes para suprir a demanda crescente.

Além da escassez de órgãos, o transplante convencional apresenta limitações clínicas relevantes, como a rejeição imunológica e os efeitos adversos associados ao uso prolongado de imunossupressores. Embora essas terapias tenham ampliado significativamente as taxas de sobrevida, impõem riscos adicionais, incluindo infecções oportunistas, neoplasias e complicações metabólicas. Soma-se a esse cenário a presença de desigualdades regionais no acesso aos procedimentos transplantológicos, particularmente em países com marcadas disparidades socioeconômicas, o que reforça a necessidade de estratégias inovadoras que transcendam o modelo convencional.

Nesse contexto, a bioimpressão tridimensional (3D) emerge como uma abordagem tecnológica promissora no campo da medicina regenerativa. Ao possibilitar a deposição controlada de células vivas e biomateriais em arquiteturas tridimensionais complexas, essa tecnologia permite a fabricação personalizada de tecidos potencialmente compatíveis com o receptor, reduzindo o risco de rejeição e ampliando as perspectivas de terapias regenerativas individualizadas (AZEVEDO et al., 2017; ZHANG et al., 2020). Inicialmente aplicada à produção de tecidos simples, como pele e cartilagem, a bioimpressão evoluiu para a construção de modelos funcionais mais complexos, incluindo estruturas hepáticas com atividade metabólica demonstrável (ZHANG et al., 2020).

Entretanto, apesar dos avanços observados, a transposição da bioimpressão para a produção de órgãos sólidos plenamente funcionais ainda enfrenta desafios técnicos substanciais. A literatura recente destaca a dificuldade de estabelecer redes vasculares eficientes capazes de sustentar tecidos tridimensionais densos e metabolicamente ativos (LIU, X. et al., 2020; LIU, W. et al., 2020). Além disso, a replicação precisa da organização celular, bem como dos microambientes bioquímicos e biomecânicos necessários à funcionalidade orgânica, permanece como um obstáculo central. Tais limitações indicam que, embora promissora, a bioimpressão ainda se encontra predominantemente em fase de consolidação pré-clínica no que se refere à produção de órgãos completos.

Diante desse panorama, torna-se fundamental analisar criticamente os avanços

científicos recentes, as limitações técnicas persistentes e as perspectivas de aplicação clínica da bioimpressão 3D como alternativa complementar ao transplante convencional. Assim, este estudo tem como objetivo examinar, de forma sistematizada, o potencial da bioimpressão tridimensional na produção de tecidos e órgãos, identificando seus principais desafios tecnológicos, implicações clínicas e perspectivas futuras no contexto da medicina regenerativa e dos transplantes.

## MÉTODOS

Este trabalho é uma revisão de literatura narrativa, que buscou reunir, analisar e discutir os principais avanços científicos e os desafios relacionados à bioimpressão 3D aplicada à medicina regenerativa, com ênfase na produção de órgãos para transplante. A pesquisa bibliográfica foi conduzida nas bases de dados PubMed, Scielo, Lilacs, e Google Scholar, abrangendo o período de 2017 a 2025, com foco nos avanços mais relevantes da área. A busca inicial resultou na identificação de 14.920 registros, distribuídos da seguinte forma: PubMed (1.929), Scielo (371), Lilacs (5.105) e Google Scholar (7.515).

Para a busca, foram utilizados os seguintes descritores em português e inglês: “bioimpressão 3D”, “impressão tridimensional de órgãos”, “engenharia de tecidos”, “transplante”, “bioprinting”, “tissue engineering” e “organ transplantation”.

Foram incluídos como critérios de inclusão: artigos originais, documentos oficiais de organismos de saúde e publicações nos idiomas português e inglês, no período definido. Como critérios de exclusão, foram descartados: resumos de congresso, editoriais, cartas ao editor, livros e capítulos de livros (utilizados para contextualização teórica) e artigos que não abordarem o tema principal da bioimpressão 3D para transplantes.

A seleção dos estudos ocorreu em três etapas sucessivas. Na primeira etapa, realizou-se a leitura dos títulos de todos os 14.920 registros identificados, resultando na seleção de 204 títulos potencialmente relevantes. Na segunda etapa, procedeu-se à leitura dos resumos desses 204 títulos, dos quais 33 foram considerados elegíveis para avaliação completa. Na terceira e última etapa, realizou-se a leitura na íntegra dos 33 artigos selecionados, culminando na inclusão final de 27 trabalhos que atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1. Avanços nas Técnicas de Bioimpressão 3D

A análise da literatura evidenciou avanços expressivos nas principais técnicas de bioimpressão 3D, destacando-se os métodos de extrusão, jato de tinta e bioimpressão assistida por laser, além de abordagens mais recentes, como a bioimpressão volumétrica e a técnica FRESH (*Freeform Reversible Embedding of Suspended Hydrogels*). Essas tecnologias diferem quanto à resolução estrutural, viscosidade dos biomateriais utilizados, viabilidade celular e capacidade de reproduzir arquiteturas teciduais complexas.

A bioimpressão por extrusão permanece como a técnica mais amplamente utilizada devido à sua versatilidade e capacidade de imprimir biomateriais altamente viscosos contendo elevada densidade celular. Esse método permite a produção de estruturas tridimensionais mais robustas e com maior estabilidade mecânica, sendo particularmente útil na fabricação de tecidos como cartilagem, pele e estruturas osteocondrais. Entretanto, o aumento da pressão mecânica durante a extrusão pode gerar estresse de cisalhamento, reduzindo parcialmente a viabilidade celular e comprometendo algumas funções biológicas.

Em contraste, a bioimpressão por jato de tinta apresenta maior velocidade de impressão e elevada resolução espacial, além de menor custo operacional. Contudo, sua utilização é limitada pela necessidade de bioinks com baixa viscosidade, restringindo a construção de tecidos mais espessos e estruturalmente complexos. Já a bioimpressão assistida por laser destaca-se pela deposição celular altamente precisa e pela elevada viabilidade das células impressas, permitindo a construção de microestruturas mais organizadas. Apesar disso, o alto custo tecnológico e a complexidade operacional ainda dificultam sua ampla utilização em larga escala.

Nos últimos anos, a bioimpressão volumétrica também ganhou destaque por permitir a formação rápida de estruturas tridimensionais completas em poucos segundos, reduzindo o tempo de exposição celular a condições potencialmente lesivas durante o processo de impressão. Entretanto, a maturação funcional desses tecidos ainda representa um desafio relevante.

Mais recentemente, a técnica FRESH vem se consolidando como uma das abordagens mais promissoras da engenharia tecidual moderna. Essa tecnologia utiliza hidrogéis de suporte reversível que possibilitam a impressão de estruturas complexas em colágeno puro, preservando alta fidelidade arquitetônica e maior estabilidade estrutural. Estudos recentes demonstraram a capacidade dessa técnica em produzir canais vasculares perfusáveis e microarquiteturas

altamente semelhantes aos tecidos fisiológicos humanos, representando avanço significativo para a construção de órgãos complexos (Tabela 1).

## 2. PROGRESSOS POR TIPO DE ÓRGÃO/TECIDO

Os avanços da bioimpressão tridimensional variam significativamente conforme o tipo de tecido ou órgão analisado, estando diretamente relacionados à complexidade estrutural, funcional e vascular de cada sistema biológico.

Tecidos como pele e cartilagem representam os modelos mais avançados da bioimpressão 3D, principalmente devido à menor dependência de vascularização profunda e à relativa simplicidade funcional quando comparados a órgãos sólidos. Estudos recentes já descrevem aplicações clínicas experimentais envolvendo regeneração cutânea em pacientes queimados, além da produção de estruturas cartilaginosas para correção de defeitos osteocondrais e reconstruções faciais. Nesses casos, a bioimpressão tem demonstrado potencial para melhorar a integração tecidual e reduzir complicações associadas aos enxertos convencionais.

Em relação ao fígado, avanços importantes foram observados na produção de modelos hepáticos bioimpressos capazes de apresentar funções metabólicas parciais, incluindo síntese de albumina, produção de ureia e atividade de enzimas do citocromo P450. Tais características indicam maior proximidade funcional em relação ao tecido hepático nativo, tornando esses modelos úteis para estudos farmacológicos e avaliação de hepatotoxicidade. Contudo, a manutenção prolongada dessas funções ainda é limitada pela dificuldade de vascularização adequada e pela complexidade multicelular do órgão hepático.

No contexto cardíaco, pesquisas recentes demonstraram a obtenção de tecidos bioimpressos com contrações sincronizadas, alinhamento celular organizado e propriedades eletrofisiológicas semelhantes às do miocárdio humano. Apesar desses avanços, desafios relacionados à integração elétrica, força contrátil adequada e risco de arritmias ainda dificultam a aplicação clínica dessas estruturas.

Já no sistema renal, os avanços permanecem mais limitados devido à extrema complexidade anatômica e funcional dos néfrons. Ainda assim, estudos recentes conseguiram produzir modelos renais experimentais contendo microestruturas tubulares e redes vasculares rudimentares. Paralelamente, importantes progressos foram observados na bioimpressão vascular, especialmente na construção de redes hierárquicas capazes de simular ramificações

fisiológicas complexas, fundamentais para a perfusão de tecidos espessos e metabolicamente ativos.

Além disso, outros modelos experimentais vêm sendo desenvolvidos, incluindo tecidos pancreáticos, estruturas pulmonares e microambientes tumorais bioimpressos, ampliando as possibilidades de aplicação da bioimpressão tridimensional tanto na medicina regenerativa quanto na pesquisa biomédica (Tabela 2).

### 3. O GRANDE GARGALO: VASCULARIZAÇÃO

Apesar dos avanços tecnológicos observados nas últimas décadas, a vascularização ainda representa o principal obstáculo para a viabilização clínica da bioimpressão de órgãos complexos. Do ponto de vista fisiológico, a sobrevivência celular em tecidos tridimensionais depende criticamente do fornecimento contínuo de oxigênio, nutrientes e remoção de metabólitos. Entretanto, a difusão passiva dessas substâncias possui alcance limitado, geralmente inferior a 100–200 micrômetros, tornando inviável a manutenção celular em tecidos espessos sem uma rede vascular funcional.

Como consequência, regiões centrais dos tecidos bioimpressos frequentemente evoluem para hipóxia, necrose e perda funcional, comprometendo a viabilidade do órgão produzido. Dessa forma, a criação de sistemas vasculares eficientes tornou-se prioridade central nas pesquisas em engenharia tecidual.

Diversas estratégias vêm sendo desenvolvidas para superar esse desafio. Entre elas, destaca-se a utilização de bioinks sacrificiais, como gelatina e Pluronic, que permitem a formação de canais internos temporários posteriormente removidos, originando estruturas perfusáveis capazes de facilitar o transporte de nutrientes e gases. Outra abordagem importante envolve a co-impressão de células endoteliais associadas a fatores pró-angiogênicos, como o VEGF, buscando estimular a formação espontânea de vasos sanguíneos após a implantação do tecido.

Além disso, sistemas microfluídicos integrados vêm sendo utilizados para simular microcirculações fisiológicas, permitindo maior controle do fluxo de fluidos e melhor manutenção celular em modelos experimentais. Mais recentemente, o uso de inteligência artificial passou a auxiliar o planejamento de redes vasculares complexas, otimizando a distribuição de fluxo sanguíneo e a geometria dos vasos bioimpressos.

Nesse contexto, estudos recentes conduzidos pela Stanford University demonstraram

modelos computacionais capazes de projetar árvores vasculares hierárquicas de maneira significativamente mais rápida e eficiente quando comparados aos métodos tradicionais. Paralelamente, a técnica FRESH demonstrou resultados promissores na produção de canais vasculares perfusáveis em colágeno puro, aproximando-se da microarquitetura vascular fisiológica humana.

Apesar desses avanços, a vascularização funcional de órgãos inteiros ainda permanece distante da prática clínica. A integração entre vasos bioimpressos e a circulação do hospedeiro continua sendo um dos maiores desafios biológicos e tecnológicos da área, limitando a produção de órgãos plenamente funcionais.

#### 4. APLICAÇÕES ALÉM DO TRANSPLANTE

Embora frequentemente associada à produção de órgãos para transplante, a bioimpressão 3D apresenta aplicações relevantes em diversas áreas da medicina e da pesquisa biomédica.

Uma das aplicações mais promissoras envolve testes farmacológicos e estudos de toxicidade. Modelos tridimensionais bioimpressos reproduzem de maneira mais fiel a arquitetura e o microambiente dos tecidos humanos quando comparados aos modelos bidimensionais convencionais, permitindo análises mais precisas da eficácia terapêutica e dos efeitos adversos de medicamentos. Dessa forma, a bioimpressão pode contribuir para redução de falhas em ensaios clínicos e diminuição da dependência de modelos animais.

Na oncologia experimental, tecidos tumorais bioimpressos vêm sendo utilizados para simular microambientes neoplásicos complexos, possibilitando melhor compreensão da progressão tumoral, invasão celular e resposta a quimioterápicos. Esses modelos apresentam potencial importante para o desenvolvimento de terapias-alvo e estratégias de medicina de precisão.

Outra aplicação relevante envolve o planejamento cirúrgico e a modelagem de doenças. Estruturas bioimpressas personalizadas podem ser utilizadas para treinamento médico, simulação de procedimentos complexos e estudo de patologias específicas. Além disso, o uso de células autólogas permite a criação de tecidos individualizados, favorecendo abordagens terapêuticas personalizadas e reduzindo riscos de rejeição imunológica.

#### 5. IMPLICAÇÕES PARA O BRASIL E POLÍTICAS PÚBLICAS

No contexto brasileiro, a bioimpressão tridimensional apresenta potencial significativo

para reduzir a dependência de transplantes convencionais e minimizar o impacto da escassez de órgãos disponíveis. As filas de espera por transplantes ainda representam importante problema de saúde pública no país, especialmente para órgãos como rins, fígado e coração.

Entretanto, a implementação dessa tecnologia no Brasil enfrenta importantes limitações estruturais, econômicas e regulatórias. Os elevados custos dos equipamentos, biomateriais e processos laboratoriais especializados dificultam sua incorporação em larga escala, sobretudo em um sistema público de saúde marcado por desigualdades regionais e limitações de financiamento.

Além disso, a distribuição desigual de centros de alta complexidade entre as diferentes regiões brasileiras pode dificultar o acesso equitativo às futuras terapias baseadas em bioimpressão. Regiões com menor infraestrutura tecnológica tendem a apresentar maiores barreiras para incorporação dessas inovações.

Nesse cenário, torna-se fundamental o fortalecimento do investimento nacional em pesquisa, inovação biotecnológica e formação de profissionais especializados. Paralelamente, a atuação de órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), será essencial para estabelecer protocolos de segurança, padronização e controle ético relacionados à utilização clínica de tecidos e órgãos bioimpressos.

9

Embora os custos iniciais da tecnologia sejam elevados, alguns estudos sugerem que sua consolidação futura poderá contribuir para redução de gastos relacionados ao tratamento prolongado de pacientes em filas de transplante e complicações associadas à escassez de órgãos.

## 6. ANÁLISE CRÍTICA E LIMITAÇÕES DA TECNOLOGIA

Apesar do grande potencial da bioimpressão tridimensional, a tecnologia ainda se encontra distante da aplicação clínica em larga escala. Diversos obstáculos científicos, tecnológicos e regulatórios permanecem limitando sua consolidação como alternativa terapêutica viável.

Entre os principais desafios destacam-se a escalabilidade da produção, a maturação funcional adequada dos tecidos, a manutenção da viabilidade celular em longo prazo e a integração eficiente com o organismo hospedeiro após o transplante. Além disso, a reprodução fiel da complexa organização multicelular presente em órgãos humanos ainda representa uma dificuldade significativa.

Outro fator limitante envolve os elevados custos operacionais associados aos

equipamentos de bioimpressão, biomateriais especializados e processos laboratoriais avançados. Questões éticas e regulatórias também permanecem em debate, especialmente em relação à padronização dos procedimentos, segurança biológica e validação clínica dos tecidos produzidos.

Paralelamente, outras abordagens da medicina regenerativa vêm apresentando avanços importantes, incluindo xenotransplantes geneticamente modificados e técnicas de engenharia tecidual baseadas em decelularização e recelularização de órgãos. Essas estratégias competem diretamente com a bioimpressão e podem apresentar vantagens específicas em determinados contextos clínicos.

Dessa forma, embora a bioimpressão 3D represente uma das áreas mais promissoras da engenharia tecidual contemporânea, sua aplicação clínica ampla ainda dependerá da superação de desafios relacionados à vascularização, funcionalidade tecidual, escalabilidade produtiva, regulamentação e viabilidade econômica. Assim, a tecnologia deve ser compreendida como uma ferramenta em desenvolvimento, com resultados altamente promissores, porém ainda predominantemente experimentais.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O transplante de órgãos permanece como uma das principais estratégias terapêuticas para o tratamento de falências orgânicas, sendo responsável por ganhos significativos de sobrevida e qualidade de vida. No entanto, a análise dos dados apresentados neste estudo evidencia que limitações estruturais — como a escassez de doadores, a rejeição imunológica e as desigualdades regionais — continuam a comprometer a efetividade do sistema de transplantes, especialmente em países com grandes disparidades socioeconômicas (OMS, 2020; Brasil, 2025).

A partir da síntese crítica dos estudos analisados, observa-se que a bioimpressão tridimensional emerge como uma estratégia tecnologicamente viável e clinicamente promissora para complementar, e potencialmente redefinir, os paradigmas atuais da medicina regenerativa. Evidências recentes indicam que a produção de tecidos bioimpressos com células autólogas apresenta vantagens relevantes na redução do risco de rejeição imunológica e na personalização terapêutica, sobretudo em aplicações envolvendo pele, cartilagem e modelos organoides funcionais (Azevedo et al., 2017; Zhang et al., 2020).

Contudo, os achados também demonstram que a transposição da bioimpressão de órgãos completos para a prática clínica em larga escala permanece limitada por desafios técnicos,

especialmente no desenvolvimento de redes vasculares funcionais, na padronização de biotintas e na escalabilidade dos processos produtivos, além de entraves regulatórios ainda não plenamente estabelecidos (Liu, W. et al., 2020; Murphy; Atala, 2020).

Dessa forma, este estudo sustenta que a bioimpressão 3D deve ser compreendida, no estágio atual, como uma tecnologia complementar ao transplante convencional, com elevado potencial transformador a médio e longo prazo. A consolidação dessa abordagem dependerá da integração entre avanços científicos, desenvolvimento tecnológico e políticas públicas voltadas à inovação em saúde, permitindo sua incorporação segura, ética e equitativa aos sistemas de transplantes.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE TRANSPLANTE DE ÓRGÃOS. Registro Brasileiro de Transplantes – RBT. São Paulo: ABTO, 2023.

AZEVEDO M, et al. Aplicações da bioimpressão 3D na medicina regenerativa: perspectivas e desafios. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, 2017; 33(2): 112–125.

AZEVEDO RM, et al. Advances in 3D printing of human organs: challenges and solutions. *Brazilian Journal of Bioengineering*, 2017; 17(2): 10–20.

BASHIR S, et al. 3D bioprinting of tissues and organs: current status and future trends. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2021; 7(2): 345–366.

BRASIL. Lei nº 9.434, de 4 de fevereiro de 1997. Dispõe sobre a remoção de órgãos, tecidos e partes do corpo humano para fins de transplante e tratamento. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Ministério da Saúde. Sistema Nacional de Transplantes: relatório anual 2023. Brasília: Ministério da Saúde, 2024.

É GN, et al. Bioimpressão 3D de tecidos e órgãos: uma prospecção tecnológica. *Cadernos de Prospecção*, 2020; 13(5): 1383–1395.

GARCIA GD, et al. Panorama dos transplantes de órgãos no Brasil: avanços, desafios e perspectivas. *Revista Bioética*, 2023; 31(1): 44–54.

JIA W, et al. Bioprinting of biomimetic constructs for tissue engineering. *Materials Today Bio*, 2021; 12: 100144.

JIANG T, et al. Advances in 3D bioprinting technology for biomedical applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2018; 87: 1–11.

JIANG X, et al. Bio-inks for 3D printing of human tissues: characterization, optimization, and applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2018; 132: 14–32.

- KIM J, et al. 3D bioprinted models for disease modeling and drug testing. *Advanced Healthcare Materials*, 2023; 12(5).
- KUMAR V, et al. Advances in 3D bioprinting of human tissues and organs for regenerative medicine. *Materials Today Bio*, 2023; 18: 100468.
- LI X, et al. Challenges and advances in 3D bioprinting of vascularized organs. *Biofabrication*, 2024; 16(2): 022001.
- LIU W, et al. Vascularization strategies in 3D bioprinting for tissue and organ regeneration. *Journal of Biomedical Materials Research Part B*, 2020; 108(6): 2076–2092.
- LIU X, et al. Biofabrication of complex tissues and organs using 3D printing technology: a review. *Scientific Reports*, 2020; 10: 2421.
- MATEOS A, et al. 3D bioprinting in tissue engineering: applications in regenerative medicine and drug testing. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022; 23(8).
- MURPHY SV, ATALA A. 3D bioprinting of tissues and organs. *Nature Biotechnology*, 2020; 38: 329–338.
- ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. *Global observatory on donation and transplantation*. Geneva: OMS, 2020.
- SANTOS MJ, et al. Desigualdades regionais no acesso ao transplante de órgãos no Brasil. *Cadernos de Saúde Pública*, 2023; 39(4): e00255422.
- SOUSA AP, et al. Aplicações da bioimpressão 3D na criação de tecidos sintéticos para testes de fármacos e toxicidade. *Scientific Electronic Archives*, 2024; 17(4): 1–10.
- STOCCO TD, et al. Bioimpressão 3D aplicada à engenharia de tecidos: uma visão abrangente do estado da arte. *Revista VIDA: Ciências da Vida*, 2023; 1(2): 1–20.
- ZHANG Y, et al. Advances in 3D printing of liver tissues for regenerative medicine applications. *Scientific Reports*, 2020; 10: 14834.
- ZHANG YS, et al. 3D bioprinting for tissue and organ fabrication. *Annals of Biomedical Engineering*, 2022; 50: 124–140.
- ZHANG YS, et al. Advances in bioprinting technologies for organ fabrication. *Trends in Biotechnology*, 2020; 38(7): 654–668.
- ZHU W, et al. Vascularized 3D printed tissue constructs: challenges and opportunities. *Biomaterials*, 2020; 252: 120103.
- ZOUBAREF LE. Bioimpressões em 3D: presente e perspectivas para remodelamento e aplicação de diferentes componentes fisiológicos na medicina regenerativa. *Revista Multidisciplinar de Educação e Meio Ambiente*, 2023; 4(2): 1–10.