

Realidade aumentada na Nefrectomia Parcial Robótica: Uma Revisão sobre Avanços em Precisão e Função Renal

Augmented Reality in Robotic Partial Nephrectomy: A Review of Advances in Precision and Renal Function

Letícia da Silva Felipe^{1,2}, Giovana Fernandes Moura^{1,2}, Marina Mesquita Simões^{1,2}, Rodrigo Damasceno Dantas^{1,2}, Victor Salazar^{1,2}, João de Sousa Pinheiro Barbosa³

¹Centro de Ensino Unificado de Brasília (CEUB);

²Liga de Cirurgia Robótica e Laparoscópica DF (LACROL-DF).

³Professor do curso de medicina CEUB

RESUMO

A Realidade Aumentada (RA), baseada em modelos virtuais tridimensionais (3DVMs) reconstruídos a partir de imagens de tomografia computadorizada (TC) ou ressonância magnética (RM), tornou-se uma ferramenta essencial para aprimorar a precisão na Nefrectomia Parcial Assistida por Robô (RAPN). Ao minimizar a necessidade de reconstrução mental de anatomias complexas, a RA aprimora a compreensão anatômica e a navegação intraoperatória. Esta revisão teve como objetivo avaliar o impacto da RA na RAPN, com foco em melhorias na compreensão anatômica, orientação cirúrgica e precisão. Foi realizada uma revisão integrativa da literatura abrangendo os últimos cinco anos, utilizando as bases de dados PubMed e BVS, com os descritores “Tumor renal”, “Cirurgia robótica”, “Nefrectomia parcial” e “Imagem tridimensional”. Treze estudos, incluindo pesquisas clínicas, pré-clínicas e de validação, foram analisados. Os resultados demonstraram que a integração de 3DVMs, impressão personalizada e navegação baseada em RA na cirurgia renal robótica proporciona benefícios significativos em relação às abordagens convencionais. Modelos virtuais baseados em perfusão, utilizando algoritmos de Voronoi, aprimoraram o mapeamento vascular e possibilitaram o clampeamento seletivo, reduzindo a perda média da função renal de 11,3% com clampeamento global para 7,7% com técnicas seletivas. De modo geral, a RA aumenta a precisão intraoperatória, reduz o dano ao parênquima e contribui para melhores desfechos pós-operatórios. Apesar dos resultados promissores, as evidências atuais derivam, em sua maioria, de estudos observacionais unicêntricos, destacando a necessidade de ensaios clínicos randomizados multicêntricos para validar sua reprodutibilidade, custo-efetividade e potencial de integração à prática cirúrgica robótica de rotina.

Palavras-chave: Realidade Aumentada; Nefrectomia Parcial Assistida por Robô; Modelos Virtuais Tridimensionais; Navegação Cirúrgica.

ABSTRACT

Augmented Reality (AR), based on three-dimensional virtual models (3DVMs) reconstructed from CT or MRI images, has become an essential tool for improving precision in Robotic-Assisted Partial Nephrectomy (RAPN). By minimizing the need for mental reconstruction of complex anatomy, AR enhances anatomical understanding and intraoperative navigation. This review aimed to evaluate the impact of AR on RAPN, focusing on improvements in anatomical comprehension, surgical guidance, and accuracy. An integrative literature review was conducted covering the last five years using PubMed and BVS databases, with descriptors “Kidney tumor,” “Robotic surgery,” “Partial nephrectomy,” and “Three-dimensional imaging.” Thirteen studies, including clinical, preclinical, and validation research, were analyzed. Results demonstrated that integrating 3DVMs, personalized printing, and AR-based navigation into robotic renal surgery provides significant benefits over conventional approaches. Perfusion-based virtual models using Voronoi algorithms improved vascular mapping and supported selective clamping, reducing mean renal function loss from 11.3% with global clamping to 7.7% with selective techniques. Overall, AR enhances intraoperative precision, reduces parenchymal damage, and contributes to better postoperative outcomes. Despite promising results, current evidence is mostly derived from single-center observational studies, emphasizing the need for multicenter randomized trials to validate its reproducibility, cost-effectiveness, and potential integration into routine robotic surgical practice.

Key-words: Augmented Reality; Robotic-Assisted Partial Nephrectomy; Three-Dimensional Virtual Models; Surgical Navigation.

Introdução

A Realidade Aumentada (RA) baseia-se na utilização de Modelos Virtuais Tridimensionais (3DVMs), gerados a partir de imagens de Tomografia Computadorizada ou Ressonância Magnética ^{1,2}. Essa tecnologia tem se consolidado como uma estratégia fundamental para aprimorar a precisão da Nefrectomia Parcial Assistida por Robótica (RAPN), ao reduzir a dependência da “construção mental” da anatomia complexa a partir de imagens bidimensionais ³. Mais recentemente, novos modelos vêm incorporando algoritmos avançados e recursos de navegação cirúrgica, com o objetivo de potencializar os resultados operatórios, proporcionar melhor compreensão anatômica e maior precisão na orientação intraoperatória ^{4,5}. Esse trabalho tem como objetivo avaliar a Realidade Aumentada na Nefrectomia Parcial Assistida por Robótica, focando na melhoria da compreensão anatômica, orientação intraoperatória e precisão cirúrgica.

Metodologia

Trata-se de uma revisão integrativa da literatura, limitada aos últimos 5 anos. As buscas foram realizadas nas bases PubMed e BVS, usando os descritores “Kidney tumor”, “robotic surgery”, “Partial nephrectomy” e “three-dimensional imaging”, combinados com os operadores booleanos AND e OR. A seleção ocorreu na plataforma Rayyan, de forma simples-cega. A análise incluiu 13 estudos (clínicos, pré-clínicos e de validação de novos modelos virtuais 3D), abordando a eficácia clínica e a precisão técnica da navegação cirúrgica.

Resultados

A análise dos estudos demonstra que a incorporação de Modelos Tridimensionais (3DVMs), impressão personalizada e guias cirúrgicos (baseados em Realidade Aumentada - RA) à cirurgia robótica renal confere benefícios clínicos importantes comparados à técnica convencional. Modelos virtuais de perfusão, desenvolvidos por algoritmos matemáticos (diagramas de Voronoi), mostraram elevada acurácia na definição das regiões vasculares e na condução do clampeamento seletivo. Em estudo com 103 pacientes, estratégias seletivas ou super seletivas foram aplicadas em 76,7% dos casos, com alta concordância entre planejamento e execução intraoperatória. Esses métodos resultaram em menor perda da função renal segmentar, com reduções médias de 11,3% (após clampeamento global) para 7,7% (após clampeamento seletivo).

Discussão

Os modelos Virtuais Tridimensionais com Regiões de Perfusão (PR-3DVMs) representam ferramentas promissoras no planejamento da nefrectomia parcial, sobretudo pela capacidade de estimar com maior precisão as zonas de vascularização. Essa vantagem é relevante diante da variabilidade anatômica da artéria renal, que frequentemente não se enquadra nas classificações clássicas⁵⁻⁷. Estudos recentes reforçam que o clampeamento seletivo guiado por PR-3DVMs está associado a melhor preservação da função renal e redução de complicações em tumores complexos⁸⁻¹⁰. Entretanto, a maioria das publicações disponíveis ainda se baseia em séries observacionais de centro único, conduzidas por cirurgiões experientes, o que pode limitar a reprodutibilidade. Portanto, os custos e a necessidade de suporte técnico especializado permanecem barreiras importantes, reforçando a necessidade de ensaios multicêntricos randomizados que avaliem a custo-efetividade dessa tecnologia¹¹⁻¹³.

Conclusão

A Realidade Aumentada na Nefrectomia Parcial Assistida por Robótica demonstra potencial significativo para aprimorar a compreensão anatômica, a orientação intraoperatória e a precisão cirúrgica. O uso de Modelos Virtuais Tridimensionais e algoritmos de perfusão contribui para melhores resultados funcionais e menor perda de parênquima renal. Embora os achados sejam promissores, a maioria dos estudos se restringe a séries observacionais de centros especializados, o que limita a generalização dos resultados. Assim, são necessários ensaios multicêntricos e controlados que confirmem a eficácia e a custo-efetividade da

Realidade Aumentada, consolidando seu papel como ferramenta complementar na prática cirúrgica robótica.

Referências

1. AMPARORE, D. et al. Three-dimensional Virtual Models of the Kidney with Colored Perfusion Regions: A New Algorithm-based Tool for Optimizing the Clamping Strategy During Robot-assisted Partial Nephrectomy. **European Urology**, v. 84, n. 4, p. 418–425, 2023. DOI: 10.1016/j.eururo.2023.04.005.
2. AMPARORE, D. et al. Computer Vision and Machine-Learning Techniques for Automatic 3D Virtual Images Overlapping During Augmented Reality Guided Robotic Partial Nephrectomy. **Technology in Cancer Research & Treatment**, v. 23, p. 1-9, 2024. DOI: 10.1177/15330338241229368.
3. OCK, J. et al. Patient-specific, deliverable, and self-expandable surgical guide development and evaluation using 4D printing for laparoscopic partial nephrectomy. **Scientific Reports**, 2024.
4. KANDA, S. et al. Comparison of parenchymal volume loss assessed by three-dimensional computed tomography volumetry and renal functional recovery between conventional and robot-assisted laparoscopic partial nephrectomy. **Asian Journal of Endoscopic Surgery**, v. 15, n. 1, p. 63-69, 2022. DOI: 10.1111/ases.12966.
5. KIM, J. K. et al. Personalised three-dimensional printed transparent kidney model for robot-assisted partial nephrectomy in patients with complex renal tumours (R.E.N.A.L. nephrometry score ≥ 7): a prospective case-matched study. **BJU International**, 2020.
6. LEE, S.; LEE, H. Y.; SONG, C. Assessment of Feasibility and Outcomes of RUS Surgical Navigation System During Robot- Assisted Partial Nephrectomy for Small Renal Masses. **International Journal of Urology**, 2025. DOI: 10.1111/iju.70014.
7. OKADA, A. et al. Three-dimensional computed tomography-based resection process map for robot-assisted partial nephrectomy: propensity score matching of a single-center retrospective study. **Journal of Surgical Oncology**, v. 129, n. 7, p. 1311-1324, 2024. DOI: 10.1002/jso.27615.
8. AMPARORE, D. et al. New Generation of 3D Virtual Models with Perfusional Zones: Perioperative Assistance for the Best Pedicle Management during Robotic Partial Nephrectomy. **Current Oncology**, v. 30, n. 4, p. 4021–4032, 2023. DOI: 10.3390/curroncol30040304.
9. McDONALD, M.; SHIRK, J. D. Application of Three-Dimensional Virtual Reality Models to Improve the Pre-Surgical Plan for Robotic Partial Nephrectomy. **Journal of the Society of Laparoscopic & Robotic Surgeons**, 2021. DOI: 10.4293/JSLS.2021.00011.

10. GROSSO, A. A. et al. Three-dimensional virtual model for robot-assisted partial nephrectomy: a propensity-score matching analysis with a contemporary control group. **World Journal of Urology**, 2024. DOI: 10.1007/s00345-024-05043-9.
11. HUANG, H. et al. Using three-dimensional virtual imaging of renal masses to improve prediction of robotic-assisted partial nephrectomy Tetrafecta with SPARE score. **World Journal of Urology**, v. 43, n. 37, 2025. DOI: 10.1007/s00345-024-05344-z.
12. XU, L. et al. A novel preoperative evaluation technique for partial nephrectomy: three-dimensional extended renal tumor plane. **World Journal of Urology**, v. 43, n. 44, 2025. DOI: 10.1007/s00345-024-05395-2.
13. HEVIA, V. et al. Three-Dimensional Virtual Models in Robot Assisted Partial Nephrectomy: A Needed Tool in the Era of Precision Surgery. **Current Urology Reports**, v. 26, n. 60, 2025. DOI: 10.1007/s11934-025-01288-