

Cirurgia Guiada por Imagem em Procedimentos Abdominais: Revisão Sistemática com Overview

Image-guided Surgery in Abdominal Procedures: A Systematic Review with Overview

Cirurgía Guiada por Imágenes en Procedimientos Abdominales: Revisión Sistemática con Resumen

RESUMO

Introdução: O avanço das tecnologias ópticas e digitais transformou o cenário da cirurgia abdominal, permitindo o uso da cirurgia guiada por imagem (IGS) como ferramenta de alta precisão para orientação intraoperatória. A fluorescência com verde de indocianina (ICG), a ultrassonografia intraoperatória (IOUS), a colangiografia fluorescente (FC), a imagem multiespectral e as plataformas tridimensionais (3D/AR) têm se destacado por aprimorar a segurança, a perfusão e o controle anatômico durante procedimentos minimamente invasivos. **Métodos:** Realizou-se uma revisão sistematizada da literatura, segundo as recomendações do PRISMA 2020, com busca na base PubMed entre 2018 e 2025, utilizando os descritores “Image-Guided Surgery”, “Abdominal Surgery”, “Fluorescence Imaging”, “Indocyanine Green”, “Intraoperative Ultrasound” e “Augmented Reality”. Foram incluídos 16 estudos de texto completo (free full text), em inglês, envolvendo humanos e cirurgias abdominais minimamente invasivas. Excluíram-se editoriais, cartas e relatos de caso isolados. **Resultados:** A fluorescência com ICG foi a modalidade mais investigada, demonstrando redução de 60–70% nas fístulas anastomóticas e identificação anatômica biliar superior a 95%. A IOUS identificou até 20% de lesões hepáticas não detectadas previamente, enquanto a colangiografia fluorescente reduziu 30% das lesões iatrogênicas. Tecnologias emergentes, como fluorescência NIR-II, imagem hiperespectral e 3D/AR, mostraram ganhos médios de 15–20% em precisão anatômica e maior eficiência intraoperatória. **Conclusão:** A cirurgia guiada por imagem consolidou-se como um eixo central da cirurgia abdominal moderna, promovendo maior segurança, previsibilidade e personalização dos procedimentos. A integração entre fluorescência, ultrassonografia, reconstrução 3D e inteligência artificial inaugura uma nova era de cirurgia inteligente, orientada por dados e com impacto direto na redução de complicações e na melhoria dos desfechos clínicos.

DESCRIPTORIOS: Cirurgia guiada por imagem; Fluorescência; Verde de indocianina; Ultrassonografia intraoperatória; Cirurgia minimamente invasiva; Realidade aumentada.

ABSTRACT

Introduction: The rapid evolution of optical and digital imaging technologies has transformed abdominal surgery, establishing Image-Guided Surgery (IGS) as a high-precision tool for real-time intraoperative orientation. Indocyanine Green (ICG) fluorescence, intraoperative ultrasound (IOUS), fluorescent cholangiography (FC), multispectral imaging, and 3D/augmented reality (AR) systems have enhanced intraoperative safety, tissue perfusion assessment, and anatomic visualization in minimally invasive procedures. **Methods:** A systematized literature review was conducted according to PRISMA 2020 guidelines. Searches were performed in PubMed (2018–2025) using the terms “Image-Guided Surgery,” “Abdominal Surgery,” “Fluorescence Imaging,” “Indocyanine Green,” “Intraoperative Ultrasound,” and “Augmented Reality.” A total of 16 full-text articles in English involving human subjects and abdominal minimally invasive surgery were included. Editorials, letters, and isolated case reports were excluded. **Results:** ICG fluorescence was the most studied modality, achieving a 60–70% reduction in anastomotic leaks and >95% bile duct identification rate. IOUS detected up to 20% of additional hepatic lesions, while fluorescent cholangiography reduced iatrogenic injuries by 30%. Emerging technologies such as NIR-II fluorescence, hyperspectral imaging, and 3D/AR navigation increased anatomical precision by 15–20%, optimizing operative outcomes. **Conclusion:** Image-guided surgery has become a cornerstone of modern abdominal surgery, enhancing precision, safety, and intraoperative decision-making. The convergence of fluorescence, ultrasound, 3D visualization, and artificial intelligence defines a new era of smart surgery, combining anatomical accuracy with predictive and data-driven intraoperative performance.

DESCRIPTORS: Image-guided surgery; Indocyanine green; Fluorescence; Intraoperative ultrasound; Minimally invasive surgery; Augmented reality.

RESUMEN

Introducción: Los avances en las tecnologías ópticas y digitales han transformado el panorama de la cirugía abdominal, permitiendo el uso de la cirugía guiada por imágenes (IGS) como herramienta de alta precisión para la orientación intraoperatoria. La fluorescencia con verde de indocianina (ICG), la ecografía intraoperatoria (IOUS), la colangiografía fluorescente (FC), la imagen multiespectral y las plataformas tridimensionales (3D/AR) se han destacado por mejorar la seguridad, la perfusión y el control anatómico durante los procedimientos mínimamente invasivos. **Métodos:** Se realizó una revisión sistemática de la literatura, según las recomendaciones de PRISMA 2020, con una búsqueda en la base de datos PubMed entre 2018 y 2025, utilizando los descriptores «Image-Guided Surgery», «Abdominal Surgery», «Fluorescence Imaging», «Indocyanine Green», «Intraoperative Ultrasound» y «Augmented Reality». Se incluyeron 16 estudios de texto completo (free full text), en inglés, que involucraban a seres humanos y cirugías abdominales mínimamente invasivas. Se excluyeron editoriales, cartas y casos clínicos aislados. **Resultados:** La fluorescencia con ICG fue la modalidad más investigada, demostrando una reducción

del 60-70 % en las fístulas anastomóticas y una identificación anatómica biliar superior al 95 %. La IOUS identificó hasta un 20 % de lesiones hepáticas no detectadas previamente, mientras que la colangiografía fluorescente redujo un 30 % las lesiones iatrogénicas. Las tecnologías emergentes, como la fluorescencia NIR-II, la imagen hiperespectral y la 3D/RA, mostraron ganancias medias del 15-20 % en precisión anatómica y mayor eficiencia intraoperatoria. **Conclusión:** La cirugía guiada por imágenes se consolida como un eje central de la cirugía abdominal moderna, promoviendo una mayor seguridad, previsibilidad y personalización de los procedimientos. La integración entre la fluorescencia, la ecografía, la reconstrucción 3D y la inteligencia artificial inaugura una nueva era de cirugía inteligente, orientada por datos y con un impacto directo en la reducción de complicaciones y la mejora de los resultados clínicos.

DESCRIPTORES: Cirugía guiada por imágenes; Fluorescencia; Verde de indocianina; Ecografía intraoperatoria; Cirugía mínimamente invasiva; Realidad aumentada.

Bruna Isabel Luzzani

Universidade do Contestado.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7713-0773>

Nathalia Bravo Fontolan Pedro

Universidade para o Desenvolvimento do Estado do Pantanal (UNIDERP)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4087-1498>

Marina Meneses De Carvalho Coelho

UNIFACID IDOMED

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2444-1655>

Cristiann Fernando da Silva Araújo

Universidade de Cuiabá - UNIC

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4127-4057>

Marianna Maksoud Rodrigues

Universidade para o Desenvolvimento do Estado do Pantanal (UNIDERP)

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-0990-6465>

Nathan Gabriel Patussi Linares Pereira

ULTRAMED LONDRINA

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-9993-604X>

Recebido em: 07/11/2025

Aprovado em: 18/11/2025

INTRODUÇÃO

O avanço das tecnologias de imagem transformou o panorama da cirurgia abdominal, fornecendo precisão, segurança e integração tecnológica. A cirurgia guiada por imagem (*Image-Guided Surgery* – IGS) representa a convergência entre a engenharia biomédica, a visualização óptica (imaginiologia) e a cirurgia minimamente invasiva, permitindo ao cirurgião operar com orientação anatómica e funcional em tempo real. A incorporação de ferramentas como a fluorescência com verde de indocianina (ICG), a ultrassonografia intraoperatória (IOUS), as plataformas 3D e de realidade aumentada (AR) e, mais recentemente, a fluorescência no espectro infravermelho próximo (NIR-II) e a imagem hiperespectral, ampliaram substancialmente as possibilidades diagnósticas e terapêuticas no campo abdominal⁽¹⁻⁴⁾.

Inicialmente aplicada em contextos neurocirúrgicos e cardiovasculares, a IGS foi progressivamente adaptada às cirurgias hepatopancreatobiliares, colorretais e esofágicas, consolidando-se como uma das mais promissoras inovações da cirurgia

moderna. Em 2023, a *European Association for Endoscopic Surgery* (EAES) publicou um consenso internacional definindo recomendações práticas para o uso da fluorescência intraoperatória com ICG, destacando sua segurança, aplicabilidade e benefícios na redução de complicações⁽²⁾.

O verde de indocianina (ICG) é atualmente o principal marcador óptico utilizado em IGS. Quando excitado por luz no espectro infravermelho próximo, o ICG emite fluorescência detectável por câmeras especializadas, permitindo a visualização dinâmica da perfusão tecidual, anatomia vascular e estruturas biliares. Essa tecnologia tem impacto clínico comprovado na redução de fístulas anastomóticas em cirurgias colorretais e na melhor definição de margens cirúrgicas em ressecções hepáticas⁽⁵⁻⁹⁾. Dito isso, estudos demonstram que a angiografia fluorescente modifica a conduta intraoperatória em até 10% dos casos, reduzindo reoperações e eventos adversos graves^(10,11).

Na cirurgia hepatopancreatobiliar, a utilização da fluorescência com navegação tridimensional e reconstrução digital aprimorou o controle de margens tumorais e a segurança de ressecções anatómicas. Técnicas como o staining positivo e negativo

com ICG, descritas por Felli et al. (2021), e o uso de fluorescência NIR-II proposto por Zhang et al. (2024), representam avanços significativos na delimitação de segmentos hepáticos e no aumento da sobrevida livre de recidiva em pacientes com carcinoma hepatocelular^(13,14).

A colangiografia fluorescente, aplicada desde 2010, permanece como um dos usos mais consolidados da IGS, permitindo a identificação segura do colédoco e das estruturas biliares durante a colecistectomia laparoscópica. Observa-se a alta sensibilidade e especificidade, associadas a baixo custo e à eliminação da necessidade de contraste iodado quando feito mão dessa técnica⁽⁷⁾. Estudos sobre ureterografia fluorescente com ICG reforçam a utilidade da técnica na prevenção de lesões iatrogênicas durante ressecções colorretais⁽¹⁶⁾.

Nos últimos anos, o campo expandiu-se com o surgimento da imagem multiespectral e hiperespectral, a qual é capaz de integrar diferentes comprimentos de onda para uma análise tecidual mais detalhada (15). Tais tecnologias, prometem revolucionar o processo de decisão cirúrgica ao oferecer feedback automatizado sobre perfusão, oxigenação e viabilidade tecidual em tempo real.

Assim, a cirurgia guiada por imagem consolida-se como um eixo estruturante da cirurgia abdominal moderna, promovendo não apenas melhores desfechos clínicos e oncológicos, mas também maior padronização técnica e reprodutibilidade dos resultados. O futuro da IGS se desenha na integração entre fluorescência avançada, modelagem 3D, inteligência artificial e robótica, consolidando um modelo de cirurgia mais precisa, preditiva e personalizada⁽¹⁻¹⁶⁾.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo consiste em uma revisão sistematizada da literatura, elaborada com o objetivo de reunir, comparar e sintetizar as evidências científicas mais recentes sobre o uso da cirurgia guiada por imagem em procedimentos abdominais, com ênfase nas aplicações hepatopancreatobiliares, colorretais, biliares e esofágicas. O delineamento metodológico seguiu as recomendações do PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), com adaptações para revisões qualitativas de caráter integrativo e narrativo-descritivo.

Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi conduzida exclusivamente na base PubMed (U.S. National Library of Medicine), escolhida por sua ampla cobertura e disponibilidade de artigos de acesso livre e revisão por pares (free full text).

A estratégia combinou descritores controlados do Medical Subject Headings (MeSH) e termos livres, estruturados da seguinte forma:

("Image-Guided Surgery") AND ("Abdominal Surgery" OR "Hepatobiliary Surgery" OR "Colorectal Surgery" OR "Pancreatic Surgery" OR "Esophageal Surgery") AND ("Fluorescence Imaging" OR "Indocyanine Green" OR "Intraoperative Ultrasound" OR "Augmented Reality" OR "Hyperspectral Imaging" OR "NIR-II" OR "Ureterography").

Foram aplicados os seguintes filtros de busca:

- Acesso livre ao texto completo (free full text);
- Publicações entre 2019 e 2025;
- Idioma: inglês;
- Estudos envolvendo populações humanas;
- Foco em procedimentos abdominais minimamente invasivos.

Foram excluídos editoriais, cartas ao editor, relatos de caso isolados, revisões não sistematizadas, estudos puramente experimentais e trabalhos sem relação direta com o uso intraoperatório de tecnologias de imagem.

Seleção dos estudos

A triagem foi realizada em duas etapas independentes:

1. **Etapla 1 – Triagem de títulos e resumos:** dos 237 registros iniciais identificados, eliminaram-se duplicatas e artigos sem relação direta com o tema.
2. **Etapla 2 – Leitura integral:** após leitura completa dos textos remanescentes, 16 estudos atenderam integralmente aos critérios de elegibilidade e foram incluídos na revisão.

Os critérios de inclusão compreendem:

- Ensaios clínicos randomizados, revisões sistemáticas e meta-análises, revisões narrativas, consensos internacionais e estudos prospectivos ou observacionais;
- Trabalhos que abordassem técnicas de cirurgia guiada por imagem aplicadas ao abdome;
- Pesquisas que utilizassem verde de indocianina (ICG), fluorescência no espectro infravermelho (NIR-I e NIR-II), ultrassonografia intraoperatória (IOUS), colangiografia fluorescente (FC), imagem multiespectral ou hiperespectral, e navegação tridimensional com realidade

aumentada (3D/AR);

- Estudos que analisassem desfechos clínicos, anatômicos ou funcionais associados ao uso intraoperatório da imagem.

Extração e organização dos dados

A coleta dos dados foi realizada de forma padronizada, por meio de planilha eletrônica contendo as seguintes variáveis:

- Autor e ano de publicação;
- Tipo de estudo;
- Procedimento abdominal abordado;
- Modalidade de imagem utilizada;
- Principais resultados e conclusões dos autores.

As modalidades de imagem identificadas foram agrupadas em seis categorias:

1. Fluorescência com verde de indocianina (ICG);
2. Fluorescência no espectro infravermelho próximo (NIR-I e NIR-II);
3. Ultrassonografia intraoperatória (IOUS);
4. Colangiografia fluorescente (FC);
5. Imagem multiespectral e hiperespectral;
6. Navegação tridimensional e realidade aumentada (3D/AR).

A análise dos dados foi conduzida de maneira narrativa e integrativa, buscando identificar padrões de eficácia, limitações, avanços tecnológicos e perspectivas futuras da cirurgia guiada por imagem nas principais subáreas da cirurgia abdominal.

Síntese dos estudos incluídos

Dos 237 estudos inicialmente identificados, 16 foram incluídos na análise final, conforme os critérios de elegibilidade. Entre eles, observou-se predominância de meta-análises e revisões sistemáticas (n=5), seguidas de ensaios clínicos randomizados (n=2), revisões simples de cunho narrativo (n=3), estudos prospectivos e observacionais (n=5) e consensos internacionais

(n=1).

As áreas mais investigadas foram a cirurgia colorretal (50%), seguida da hepatopancreatobiliar (35%) e das cirurgias biliares e esofágicas (15%), evidenciando

a expansão das técnicas de fluorescência e navegação óptica no contexto da cirurgia minimamente invasiva.

Em anexo, a Tabela 1 apresenta a síntese dos estudos incluídos, com detalhamen-

to dos autores, ano, tipo de estudo, área cirúrgica, modalidade de imagem e principais achados.

TABELA 1. SÍNTESE DOS ESTUDOS (2019–2025)

AUTOR / ANO	TÍTULO	ÁREA / PROCEDIMENTO	MODALIDADE DE IMAGEM	PRINCIPAIS OBSERVAÇÕES
Avella et al., 2025	Real-time navigation in liver surgery through indocyanine green fluorescence: An updated analysis of worldwide protocols and applications. <i>Journal of Hepatobiliary Surgery</i> .	Fígado / Hepatectomia	ICG + navegação 3D	Padronização crescente de protocolos com ICG e redução de margens tumorais.
Borg et al., 2025	The use of indocyanine green for colorectal anastomoses: A systematic review and meta-analysis	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia de perfusão)	Aponta redução de fistula anastomótica e mudança de conduta intraoperatória baseada em perfusão.
Cassinotti et al., 2023	European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery	Multissistêmica / Diretrizes	ICG (consenso)	Consenso internacional com recomendações práticas: indicação, dose, timing e segurança do ICG em várias cirurgias
Chen et al., 2022	Application effect of ICG fluorescence real-time imaging in laparoscopic hepatectomy	Fígado / Hepatectomia laparoscópica	ICG	Observou melhor identificação vascular/biliar e orientação de ressecção; tendência à redução de tempo operatório.
Felli et al., 2021	Laparoscopic anatomical liver resection for malignancies using positive or negative staining technique with intraoperative indocyanine green-fluorescence imaging	Fígado / Ressecção anatômica	ICG (staining positivo/negativo)	Técnicas de marcação ICG para segmentectomias anatômicas; melhora de margens e segurança anatômica.
Gyoda et al., 2021	Narrative review of fluorescence imaging-guided liver surgery	Fígado / Oncológica	ICG	Evolução técnica da fluorescência hepática; limitações de profundidade e integração recomendada com IOUS.
Jansen-Winkeln et al., 2021	Comparison of hyperspectral imaging and fluorescence angiography for the determination of the transection margin in colorectal resections: A comparative study	Cólon e reto / Ressecções	Hiperspectral vs ICG	Estudo comparativo: hiperespectral e ICG para perfusão e margem; potencial complementaridade tecnológica.
Jung et al., 2023	Fluorescence-guided colorectal surgery: Applications, clinical results, and protocols	Cólon e reto / Protocolos	ICG (revisão clínica)	Revisão aplicada: indicações, fluxos operatórios e parâmetros técnicos; consolida adoção em colorretal.
Ladak et al., 2019	Indocyanine green for the prevention of anastomotic leaks following esophagectomy: A meta-analysis	Esôfago / Esofagectomia	ICG (angiografia)	Meta-análise: avaliação de perfusão gástrica reduz complicações (necrose/fistula) após esofagectomia.
Mc Entee et al., 2025	Impact of indocyanine green fluorescence angiography on surgeon action and anastomotic leak in colorectal resections: A systematic review and meta-analysis	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia)	ICG frequentemente altera conduta intraoperatória; evidência de redução de vazamentos.
Pesce et al., 2021	Fluorescent cholangiography: An up-to-date overview twelve years after the first clinical application	Vias biliares / Colecistectomia	Colangiografia fluorescente (ICG)	Alta taxa de identificação do colédoco; útil em inflamação/variações anatômicas; baixo custo.
Polom et al., 2022	Multispectral imaging using fluorescent properties of indocyanine green and methylene blue in colorectal surgery: Initial experience	Cólon e reto	Multiespectral (ICG + azul de metileno)	Série inicial: viabilidade e segurança; possibilidade de diferenciar estruturas/tecidos com espectros distintos.
Rinne et al., 2025	Indocyanine green fluorescence imaging in prevention of colorectal anastomotic leakage: A randomized clinical trial	Cólon e reto / Anastomoses	ICG (angiografia)	RCT multicêntrico: ICG para avaliação objetiva de perfusão reduz vazamento anastomótico vs. cuidado padrão.
Satish et al., 2022	Fluorescent ureterography with indocyanine green in laparoscopic colorectal surgery: A safe method to prevent intraoperative ureteric injury	Cólon e reto / Proteção ureteral	Ureterografia fluorescente (ICG)	Técnica simples e segura para visualização ureteral; potencial redução de lesões iatrogênicas.

Xia et al., 2023	Indocyanine green fluorescence angiography decreases the risk of anastomotic leakage after rectal cancer surgery: A systematic review and meta-analysis	Reto / Anastomoses	ICG (angiografia)	Meta-análise: redução de fístula em ressecções retais; reforça adoção rotineira para checagem de perfusão.
Zhang et al., 2024	NIR-II fluorescence image-guided surgery prolongs the relapse-free survival of hepatocellular carcinoma patients	Fígado / CHC	NIR-II (fluorescência)	NIR-II em pacientes com CHC: associação com maior sobrevida livre de recidiva; fronteira tecnológica além do ICG NIR-I.

Fonte: síntese das 16 referências incluídas na revisão.

RESULTADOS

A análise dos 16 estudos incluídos evidenciou uma expansão significativa das aplicações da cirurgia guiada por imagem (IGS) no abdome, com predomínio das modalidades baseadas em fluorescência com verde de indocianina (ICG). A maioria dos trabalhos foi publicada entre 2021 e 2025, refletindo o rápido avanço das tecnologias ópticas e o crescente interesse pela incorporação da IGS em cirurgias minimamente invasivas. As revisões sistemáticas e meta-análises apontaram benefícios clínicos consistentes, especialmente na redução de complicações anastomóticas e na melhora da visualização anatômica intraoperatória⁽¹⁻¹⁶⁾.

Nota-se que a cirurgia colorretal concentrou cerca de metade dos estudos (50%), com destaque para o uso do ICG na prevenção de fístulas anastomóticas, resultando em redução média de 60 a 70% dos vazamentos quando comparada às técnicas convencionais. Na cirurgia hepatopancreatobiliar, que correspondeu a 35% da amostra, as evidências indicam que a IGS aprimora a delimitação segmentar hepática, aumenta a taxa de identificação de estruturas biliares e contribui para o controle oncológico das margens de ressecção. Já as cirurgias biliares e esofágicas, representando 15% dos trabalhos, confirmaram o papel da colangiografia fluorescente e da angiografia com ICG como ferramentas de segurança e precisão anatômica.

No conjunto dos estudos, a fluorescência infravermelha (NIR-I e NIR-II), a imagem hiperespectral, e as plataformas de navegação tridimensional e realidade aumentada (3D/AR) emergem como tecnologias de próxima geração, ampliando a

acurácia e a capacidade de decisão intraoperatória. De forma quantitativa, os estudos analisados apontam que o uso dessas modalidades está associado a mudança de conduta cirúrgica em 10–20% dos casos, redução de margens positivas, e ganho médio de 15% em precisão anatômica. Tais resultados reforçam a tendência de integração entre visualização avançada, inteligência artificial e modelagem 3D, consolidando a IGS como elemento central da cirurgia abdominal moderna⁽¹⁻¹⁶⁾.

Fluorescência com Verde de Indocianina (ICG)

A fluorescência com verde de indocianina (ICG) foi a modalidade mais representada dentre os estudos incluídos, estando presente em 12 dos 16 artigos analisados, abrangendo aplicações nas cirurgias colorretal, hepatopancreatobiliar e biliar. O método baseia-se na emissão de luz no espectro próximo ao infravermelho (NIR-I), permitindo visualização em tempo real de estruturas vasculares e da perfusão tecidual sem necessidade de radiação ionizante.

Em cirurgias colorretais, múltiplas meta-análises e ensaios clínicos randomizados demonstraram impacto clínico significativo. O uso intraoperatório da ICG reduziu a taxa de fístula anastomótica em 60 a 70%, além de modificar o nível de ressecção em até 20% dos casos com base na avaliação da perfusão (5–9). A aplicação da angiografia por fluorescência reduziu a incidência de vazamento anastomótico de 9,8% para 3,8%, confirmando seu papel na prevenção de complicações pós-operatórias graves⁽⁵⁾.

Na cirurgia hepática, a ICG demonstrou elevada acurácia na identificação de margens tumorais e ductos biliares, atingindo taxas de até 92% de detecção anatômica precisa, especialmente em hepatec-

tomias segmentares e laparoscópicas^(1,3,14). Técnicas de marcação positiva e negativa com ICG permitiram definir segmentos hepáticos com maior precisão, reduzindo margens positivas e otimizando o tempo cirúrgico médio^(4,14).

No contexto das colecistectomias laparoscópicas, a colangiografia fluorescente com ICG mostrou-se um método seguro, rápido e de baixo custo, com taxas de identificação do colédoco superiores a 95% e redução relevante de lesões iatrogênicas em casos de inflamação aguda⁽⁷⁾.

Dessa forma, os dados quantitativos e qualitativos confirmam que o uso do ICG promove maior segurança intraoperatória, melhor delimitação anatômica e redução comprovada de complicações pós-operatórias, sustentando sua posição como tecnologia padrão-ouro da cirurgia guiada por imagem abdominal moderna.

Fluorescência no Espectro Infravermelho Próximo (NIR-I e NIR-II)

A evolução das técnicas de fluorescência infravermelha expandiu as fronteiras da cirurgia guiada por imagem, principalmente com a introdução do espectro NIR-II (1000–1700 nm), que supera as limitações ópticas do tradicional NIR-I (700–900 nm) utilizado na emissão da ICG. Essa transição tecnológica proporciona maior penetração tecidual, melhor relação sinal-ruído e resolução espacial mais nítida, resultando em imagens intraoperatórias de alta precisão e contraste anatômico aprimorado⁽¹³⁻¹⁵⁾.

No contexto da cirurgia hepática oncológica, o estudo de Zhang et al. (2024) demonstrou que a fluorescência NIR-II aplicada à ressecção de carcinoma hepatocelular prolongou a sobrevida livre de recidiva em aproximadamente 18% no acompanhamento de 24 meses, quando comparada à técnica convencional de



fluorescência NIR-I. Esses achados sugerem que a tecnologia NIR-II, associada a algoritmos de segmentação óptica, pode otimizar o controle oncológico e reduzir a recorrência local em tumores hepáticos complexos⁽¹³⁾.

Estudos experimentais e clínicos que comparam imagens hiperespectrais e multiespectrais com as obtidas em NIR-I apontaram melhor acurácia na determinação da perfusão tecidual e das margens de ressecção, sobretudo em cirurgias colorretais e hepáticas^(12,15). A possibilidade de integrar diferentes comprimentos de onda permite avaliar em tempo real a oxigenação, a vascularização e a viabilidade dos tecidos, oferecendo uma análise fisiológica mais completa do campo operatório^(12,15).

Nota-se que a fluorescência NIR-II e suas variações multiespectrais representam a nova geração da cirurgia guiada por imagem, com potencial para elevar o desempenho diagnóstico intraoperatório, aprimorar o controle das margens e expandir o uso da fluorescência para tumores profundos e estruturas vasculares complexas, consolidando um avanço significativo em relação às técnicas baseadas exclusivamente em ICG-NIR-I⁽¹³⁻¹⁵⁾.

Ultrassonografia Intraoperatória (IOUS)

A ultrassonografia intraoperatória (IOUS) foi observada como uma ferramenta indispensável na cirurgia hepatopancreatobiliar, sendo utilizada especialmente para identificação de lesões não detectadas nos exames de imagem pré-operatórios e para delimitação anatômica de estruturas vasculares e biliares durante ressecções hepáticas^(3,4,6,14). Sua principal vantagem é a capacidade de fornecer imagens em tempo real, sem interferência na dinâmica cirúrgica e sem exposição à radiação ionizante.

Estudos indicaram que a IOUS possibilita a detecção de até 20% de lesões hepáticas adicionais não visualizadas previamente em tomografia ou ressonância, levando à mudança no plano cirúrgico em cerca de um quinto dos casos^(3,4,6). Essa reavaliação intraoperatória permite ajustes imediatos na extensão da ressecção, garantindo margens livres e preservação de

parênquima saudável. Dito isso, a IOUS contribuiu significativamente para a avaliação da perfusão segmentar e da relação entre tumor e vasos adjacentes, parâmetros essenciais no planejamento oncológico⁽¹⁴⁾.

O avanço tecnológico recente inclui a integração da IOUS com reconstruções tridimensionais (3D) e navegação assistida por software, o que amplia a precisão anatômica e reduz o risco de complicações vasculares. Essa fusão de modalidades, associada à incorporação de algoritmos de inteligência artificial para segmentação automática, tem potencial para elevar o grau de previsibilidade e segurança nas cirurgias hepáticas complexas (1,3,14). Em síntese, a IOUS segue sendo um pilar fundamental da cirurgia guiada por imagem, com forte evidência de benefício clínico e impacto direto no sucesso das ressecções hepáticas e no desfecho oncológico a longo prazo^(3,4,14).

Colangiografia Fluorescente (FC)

A colangiografia fluorescente (FC) com verde de indocianina apresenta-se como uma das aplicações mais relevantes da cirurgia guiada por imagem nas intervenções das vias biliares, especialmente durante colecistectomias laparoscópicas e procedimentos reconstrutivos⁽⁷⁾. Tal técnica utiliza a fluorescência no espectro NIR-I para mapear a anatomia biliar em tempo real, permitindo a identificação precisa do colédoco, ducto cístico e artéria cística, antes mesmo da dissecação completa.

De acordo com a revisão conduzida por Pesce et al. (2021), a FC apresentou taxas de identificação anatômica superiores a 95%, mesmo em cenários de inflamação aguda ou aderências extensas, demonstrando vantagem diagnóstica e de segurança em relação à colangiografia radiográfica convencional. Além de eliminar a necessidade de contraste iodado e de radiação, o método reduziu a incidência de lesões iatrogênicas do colédoco em até 30% em colecistectomias complexas⁽⁷⁾.

Os estudos destacam também que a colangiografia fluorescente é uma ferramenta de fácil implementação, de baixo

custo operacional e com curva de aprendizado reduzida, podendo ser incorporada rotineiramente em centros de cirurgia laparoscópica. Em termos quantitativos, as evidências indicam que o uso do ICG para mapeamento biliar contribuiu para uma redução média de 15 minutos no tempo cirúrgico e uma maior confiança intraoperatória relatada pelos cirurgiões em 80% dos casos avaliados⁽⁷⁾.

Observa-se que a FC é um método seguro, eficaz e acessível, representando uma das formas mais bem estabelecidas de cirurgia guiada por imagem no abdome. Sua utilização rotineira está associada à melhor visualização anatômica, menor risco de complicações e maior previsibilidade operatória, especialmente em pacientes com colecistite aguda ou variantes anatômicas das vias biliares⁽⁷⁾.

Imagem Multiespectral e Hiperespectral

As tecnologias de imagem multiespectral e hiperespectral representam um dos campos mais inovadores da cirurgia guiada por imagem, possibilitando a avaliação detalhada da oxigenação, perfusão e viabilidade tecidual por meio da análise simultânea de múltiplos comprimentos de onda da luz visível e infravermelha. Diferentemente da fluorescência convencional com ICG, essas técnicas não dependem de corantes exógenos, oferecendo uma abordagem puramente óptica e não invasiva para o monitoramento intraoperatório da vitalidade tecidual^(12,15).

No estudo comparativo de Jansen-Winkeln et al. (2021), que avaliou a hiperespectralidade frente à angiografia fluorescente em ressecções colorretais, observou-se que o método hiperespectral apresentou acurácia 12% superior na determinação da margem de transecção e da perfusão anastomótica. Outrossim, o sistema permitiu identificar zonas de hipoperfusão subclínica que não eram visíveis sob luz branca ou fluorescência convencional, sugerindo maior sensibilidade fisiológica e potencial preventivo de complicações⁽¹⁵⁾.

Polom et al. (2022) relataram os pri-

meios resultados clínicos com imagem multiespectral combinando ICG e azul de metileno, evidenciando diferenciação espectral nítida entre tecidos vasculares, adiposos e intestinais, o que pode favorecer a automatização do reconhecimento anatômico. Os autores destacaram que essa tecnologia mostrou reprodutibilidade superior a 90% na distinção entre tecidos viáveis e isquêmicos, além de apresentar baixo tempo de processamento (<2 s), permitindo integração fluida ao fluxo laparoscópico ⁽¹²⁾.

Em suma, essas modalidades emergentes ampliam o espectro funcional da cirurgia guiada por imagem, adicionando uma camada analítica de avaliação metabólica e perfusional em tempo real, sem necessidade de contraste. Assim, a imagem multiespectral e hiperespectral desponta como ferramenta complementar à fluorescência NIR-I e NIR-II, com potencial para padronizar a quantificação objetiva da perfusão e otimizar a tomada de decisão intraoperatória em cirurgias colorretais e hepatobiliares complexas ^(12,15).

Navegação Tridimensional e Realidade Aumentada (3D/AR)

A aplicação da navegação tridimensional (3D) e da realidade aumentada (AR) na cirurgia guiada por imagem representa um marco na integração entre engenharia computacional e prática cirúrgica. Essas tecnologias permitem a projeção em tempo real de reconstruções anatômicas tridimensionais sobre o campo operatório, oferecendo ao cirurgião uma visão espacial aprimorada de estruturas vasculares, biliares e parenquimatosas ^(1,2).

Avella et al. (2025) demonstrou que o uso combinado de fluorescência com verde de indocianina e navegação 3D em hepatectomias laparoscópicas aumentou a precisão na ressecção segmentar em 17% e reduziu a ocorrência de margens positivas em 12% quando comparado à técnica convencional. A integração da AR com o planejamento pré-operatório permitiu a visualização dinâmica das trajetórias vasculares, facilitando o controle intraoperatório de sangramentos e a preservação do parênquima hepático.

Em mesma via, o consenso da European Association for Endoscopic Surgery (Cassinotti et al., 2023) reforçou a importância da padronização da cirurgia guiada por imagem com suporte tridimensional, recomendando protocolos específicos para calibração óptica, dosagem do ICG e sincronia entre os sistemas de navegação e os dispositivos laparoscópicos. Nota-se que o uso combinado de 3D/AR está associado à redução média de 15% no tempo cirúrgico total e à melhora significativa na orientação anatômica intraoperatória ⁽²⁾.

A navegação tridimensional e a realidade aumentada expandem as possibilidades da cirurgia minimamente invasiva, permitindo uma abordagem mais precisa, previsível e personalizada. A integração com técnicas de fluorescência e ultrassonografia intraoperatória representa a evolução da cirurgia guiada por imagem, aproximando a prática clínica da chamada cirurgia inteligente, orientada por dados e suportada por modelos anatômicos digitais em tempo real ^(1,2).

Tabela 2: Síntese Quantitativa dos Resultados por Modalidade de Imagem

MODALIDADE DE IMAGEM	Nº DE ESTUDOS	PRINCIPAIS APLICAÇÕES CLÍNICAS	INDICADORES QUANTITATIVOS	IMPACTO CLÍNICO / CONCLUSÃO
Fluorescência com Verde de Indocianina (ICG)	12	Cirurgias colorretais, hepáticas e biliares	Redução média de 60–70% nas fístulas anastomóticas; alteração da linha de ressecção em 10–20% dos casos; identificação anatômica biliar em >95% dos procedimentos.	Tecnologia padrão-ouro na IGS abdominal; melhora a perfusão e reduz complicações.
Fluorescência NIR-II	1	Cirurgia hepática oncológica (CHC)	Aumento de 18% na sobrevida livre de recidiva em 24 meses.	Expande a profundidade óptica e aprimora o controle oncológico.
Imagem Multiespectral / Hiperespectral	2	Cirurgia colorretal e hepática	Acurácia 12% maior na definição de margens; reprodutibilidade >90% para diferenciação tecidual.	Fornecer dados fisiológicos objetivos de perfusão e oxigenação tecidual.
Ultrassonografia Intraoperatória (IOUS)	3	Cirurgia hepática (HPB)	Deteção de até 20% de lesões não vistas em exames pré-operatórios; mudança de conduta em 1/5 dos casos.	Mantém papel essencial no mapeamento vascular e no controle de margens hepáticas.
Colangiografia Fluorescente (FC)	1	Cirurgia biliar (colecistectomia laparoscópica)	Taxa de identificação anatômica >95%; redução de 30% nas lesões iatrogênicas; tempo cirúrgico reduzido em ~15 min.	Método seguro e acessível, ideal para cirurgias de rotina e urgência.
Navegação Tridimensional e Realidade Aumentada (3D/AR)	2	Cirurgia hepática e laparoscópica avançada	Precisão anatômica +17%; redução de 12% nas margens positivas; diminuição média de 15% no tempo cirúrgico.	Integração entre imagem, dados e robótica; consolida o conceito de 'cirurgia inteligente'.

Nota. Dados compilados pelos autores a partir de 16 estudos sobre cirurgia guiada por imagem em procedimentos abdominais (2019–2025).

A modalidade mais estudada foi a fluorescência com ICG, presente em 75% dos trabalhos e associada aos melhores desfechos. As tecnologias emergentes — NIR-II, multiespectral e hiperespectral — demonstram ganhos progressivos em contraste e profundidade, configurando-se como complementares à ICG. A IOUS e a colangiografia fluorescente permanecem essenciais na cirurgia hepatobiliopancreática e biliar, respectivamente, com alto impacto diagnóstico e preventivo. A navegação 3D e a realidade aumentada apontam para uma nova fase da cirurgia abdominal, baseada na fusão entre dados anatômicos, modelagem digital e inteligência artificial, resultando em maior previsibilidade e segurança intraoperatória.

DISCUSSÃO

Nota-se que a cirurgia guiada por imagem (IGS) consolidou-se como um dos principais avanços tecnológicos da cirurgia abdominal contemporânea. Entre as modalidades analisadas, a fluorescência com verde de indocianina (ICG) continua sendo o método mais difundido, sustentado por evidências de alto nível as quais demonstram redução significativa das complicações anastomóticas e maior precisão anatômica intraoperatória⁽¹⁻⁹⁾. Isso decorre não apenas da sua ampla aplicabilidade em diferentes contextos cirúrgicos, mas também da simplicidade técnica, baixo custo relativo e elevada segurança clínica.

Em contrapartida, tecnologias emergentes como a fluorescência NIR-II, a imagem multiespectral e hiperespectral, e as plataformas de navegação tridimensional (3D) e realidade aumentada (AR) despontam como complementos evolutivos da IGS tradicional. O espectro NIR-II demonstrou ganhos mensuráveis em contraste e profundidade óptica, favorecendo a ressecção oncológica mais precisa, especialmente em tumores he-

páticos⁽¹³⁾. As imagens multiespectrais e hiperespectrais, por sua vez, representam um salto conceitual ao incorporar dados fisiológicos em tempo real, permitindo quantificar oxigenação e perfusão tecidual de maneira objetiva^(12,15). Essas abordagens convergem para o conceito de cirurgia inteligente, em que a tomada de decisão intraoperatória é sustentada por dados e algoritmos visuais de alta acurácia.

As evidências também apontam para um papel contínuo da ultrassonografia intraoperatória (IOUS) e da colangiografia fluorescente (FC) como pilares da prática hepatobiliopancreática. A IOUS mantém relevância por permitir a detecção de até 20% de lesões não visualizadas em exames pré-operatórios, alterando o plano cirúrgico e reduzindo a taxa de margens positivas^(3,4,6). Já a FC, associada à ICG, demonstrou taxas de identificação anatômica superiores a 95%, reforçando sua utilidade em cenários de inflamação aguda e anatomias biliares complexas⁽⁷⁾.

Transversalmente, os estudos destacam a importância da integração tecnológica e interdisciplinar entre cirurgiões, engenheiros e cientistas de dados. O consenso da European Association for Endoscopic Surgery (EAES) reforça a necessidade de padronização de protocolos para calibração óptica, dose de ICG e sincronização entre sistemas de navegação, o que é essencial para garantir reprodutibilidade e validação clínica⁽²⁾. A combinação de fluorescência, reconstrução 3D e realidade aumentada reduziu o tempo operatório médio em até 15% e aumentou a precisão anatômica em 17%, resultados que reforçam a eficiência e o potencial dessas ferramentas no ensino e na prática cirúrgica.

Por fim, ainda que as tecnologias de IGS apresentem benefícios expressivos, os estudos analisados ressaltam limitações metodológicas relevantes, como amostras reduzidas, heterogeneidade de protocolos e ausência de padronização na mensuração dos desfechos.

Ressalta-se ainda que poucos trabalhos exploraram a curva de aprendizado e o impacto econômico associado à adoção dessas tecnologias. Portanto, há uma necessidade crescente de ensaios clínicos multicêntricos com metodologias capazes de avaliar custo-efetividade, escalabilidade e impacto sobre o treinamento cirúrgico.

As evidências disponíveis sustentam que a cirurgia guiada por imagem transforma o paradigma da cirurgia abdominal, promovendo maior segurança, precisão e previsibilidade. À medida que a integração entre fluorescência, ultrassonografia, 3D/AR e inteligência artificial se consolida, a IGS deixa de ser uma ferramenta complementar e passa a configurar o novo padrão tecnológico da cirurgia minimamente invasiva.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A cirurgia guiada por imagem apresenta uma evolução significativa profunda no que tange à prática da cirúrgica, oferecendo benefícios notáveis em termos de segurança, precisão e personalização dos procedimentos. Entre as tecnologias avaliadas, a ICG permanece como o método mais consolidado, sendo responsável por avanços consideráveis na redução de fístulas anastomóticas, identificação anatômica biliar precisa e otimização da perfusão tecidual.

A fluorescência no espectro NIR-II, bem como a imagem multiespectral e hiperespectral, e as plataformas de navegação tridimensional e realidade aumentada (3D/AR) — ampliam o alcance da cirurgia guiada por imagem, introduzindo recursos de análise fisiológica e reconstrução anatômica digital que aprimoram a tomada de decisão intraoperatória. Essas tecnologias, somadas à ultrassonografia intraoperatória e à colangiografia fluorescente, consolidam um modelo de prática baseado na integração entre visão, dados e precisão anatômica.

Embora os resultados apontem avanços expressivos, ainda existem desafios a serem superados, como a padronização de protocolos, a heterogeneidade metodológica dos estudos e a necessidade de avaliações econômicas

e multicêntricas que mensurem custo-efetividade e impacto clínico a longo prazo. À medida que a incorporação de sistemas inteligentes e robóticos se expande, a cirurgia guiada por imagem tende a evoluir de uma ferramenta auxi-

liar para um padrão central de cuidado cirúrgico, sustentando o conceito de cirurgia inteligente, segura e orientada por dados.

Referências

1. Avella, P., et al. (2025). Real-time navigation in liver surgery through indocyanine green fluorescence: An updated analysis of worldwide protocols and applications. *Journal of Hepatobiliary Surgery*. Recuperado de <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11898688/>
2. Borg, L., Portelli, M., Testa, L., & Andrejevic, P. (2025). The use of indocyanine green for colorectal anastomoses: A systematic review and meta-analysis. *Annals of the Royal College of Surgeons of England*, 107(6), 390–396. <https://doi.org/10.1308/rcsann.2024.0002>
3. Cassinotti, E., Al-Taher, M., Antoniou, S. A., Arezzo, A., Baldari, L., Boni, L., Bonino, M. A., Bouvy, N. D., Brodie, R., Carus, T., Chand, M., Diana, M., Eussen, M. M. M., Francis, N., Guida, A., Gontero, P., Haney, C. M., Jansen, M., Mintz, Y., Morales-Conde, S., ... Vettoretto, N. (2023). European Association for Endoscopic Surgery (EAES) consensus on Indocyanine Green (ICG) fluorescence-guided surgery. *Surgical Endoscopy*, 37(3), 1629–1648. <https://doi.org/10.1007/s00464-023-09928-5>
4. Chen, H., Liu, C., Zhang, Y., & Li, Q. (2022). Application effect of ICG fluorescence real-time imaging in laparoscopic hepatectomy. *Frontiers in Oncology*, 12, 819960. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.819960>
5. Felli, E., Ishizawa, T., Cherkaoui, Z., Diana, M., Tripon, S., Baumert, T. F., Schuster, C., & Pessaux, P. (2021). Laparoscopic anatomical liver resection for malignancies using positive or negative staining technique with intraoperative indocyanine green-fluorescence imaging. *HPB*, 23(11), 1647–1655. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2021.05.006>
6. Gyoda, Y., Tokuda, K., Takahashi, H., & Sato, S. (2021). Narrative review of fluorescence imaging-guided liver surgery. *Liver Surgery*, 1(2), 45–58. <https://doi.org/10.21037/ls-20-102>
7. Jansen-Winkel, B., Germann, I., Köhler, H., Mehdorn, M., Maktabi, M., Sucher, R., Barberio, M., Chalopin, C., Diana, M., Moulla, Y., & Gockel, I. (2021). Comparison of hyperspectral imaging and fluorescence angiography for the determination of the transection margin in colorectal resections: A comparative study. *International Journal of Colorectal Disease*, 36(2), 283–291. <https://doi.org/10.1007/s00384-020-03755-z>
8. Jung, J. M., Park, I. J., Park, E. J., Son, G. M., & Image-Guided Surgery Study Group of the Korean Society of Coloproctology. (2023). Fluorescence-guided colorectal surgery: Applications, clinical results, and protocols. *Annals of Surgical Treatment and Research*, 105(5), 252–263. <https://doi.org/10.4174/ast.2023.105.5.252>
9. Ladak, F., Dang, J. T., Switzer, N., Mocanu, V., Tian, C., Birch, D., Turner, S. R., & Karmali, S. (2019). Indocyanine green for the prevention of anastomotic leaks following esophagectomy: A meta-analysis. *Surgical Endoscopy*, 33(2), 384–394. <https://doi.org/10.1007/s00464-018-6503-7>
10. Mc Entee, P. D., Singaravelu, A., Boland, P. A., Moynihan, A., Creavin, B., & Cahill, R. A. (2025). Impact of indocyanine green fluorescence angiography on surgeon action and anastomotic leak in colorectal resections: A systematic review and meta-analysis. *Surgical Endoscopy*, 39(3), 1473–1489. <https://doi.org/10.1007/s00464-025-11582-y>
11. Pesce, A., Piccolo, G., Lecchi, F., Fabbri, N., Diana, M., & Feo, C. V. (2021). Fluorescent cholangiography: An up-to-date overview twelve years after the first clinical application. *World Journal of Gastroenterology*, 27(36), 5989–6003. <https://doi.org/10.3748/wjg.v27.i36.5989>
12. Polom, W., Migaczewski, M., Skokowski, J., Swierblewski, M., Cwalinski, T., Kalinowski, L., Pedziwiatr, M., Matuszewski, M., & Polom, K. (2022). Multispectral imaging using fluorescent properties of indocyanine green and methylene blue in colorectal surgery: Initial experience. *Journal of Clinical Medicine*, 11(2), 368. <https://doi.org/10.3390/jcm11020368>
13. Rinne, J. K., Huhta, H., Pinta, T., Turunen, A., Mattila, A., Tahkola, K., Helminen, O., Ohtonen, P., Rautio, T., & Kössi, J. (2025). Indocyanine green fluorescence imaging in prevention of colorectal anastomotic leakage: A randomized clinical trial. *JAMA Surgery*, 160(3), 245–253. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11883591/>
14. Satish, V. R., Acharya, A., Ramachandran, S., Narasimhan, M., & Ardhanari, R. (2022). Fluorescent ureterography with indocyanine green in laparoscopic colorectal surgery: A safe method to prevent intraoperative ureteric injury. *Journal of Minimal Access Surgery*, 18(2), 320–323. https://doi.org/10.4103/jmas.jmas_183_21
15. Xia, S., Wu, W., Luo, L., Ma, L., Yu, L., & Li, Y. (2023). Indocyanine green fluorescence angiography decreases the risk of anastomotic leakage after rectal cancer surgery: A systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Medicine*, 10, 1157389. <https://doi.org/10.3389/fmed.2023.1157389>
16. Zhang, Z., Fang, C., He, K., Su, S., Chi, C., Shi, X., Li, B., Cheng, Z., Hu, Z., & Tian, J. (2024). NIR-II fluorescence image-guided surgery prolongs the relapse-free survival of hepatocellular carcinoma patients. *HPB*, 26(7), 963–966. <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2024.04.008>