

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi queda condicionat a l'acceptació de les condicions d'ús estableties per la següent llicència Creative Commons:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=ca>

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis queda condicionado a la aceptación de las condiciones de uso establecidas por la siguiente licencia Creative Commons:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=es>

WARNING. The access to the contents of this doctoral thesis is limited to the acceptance of the use conditions set by the following Creative Commons license:  <https://creativecommons.org/licenses/?lang=en>

TESIS DOCTORAL

Evaluación intraoperatoria de la perfusión de
colgajos libres de perforantes en
reconstrucción mamaria mediante termografía
dinámica infrarroja, angiografía con verde de
indocianina y espectroscopía infrarroja

Doctorando: Andree Ibarra Estupiñan

Directores: Manuel Fernández Garrido, Xavier León Vintró y Jaume Masià Ayala

Tutor: Xavier León Vintró

Programa de Doctorado en Cirugía y Ciencias Morfológicas

Departamento de Cirugía

Universitat Autònoma de Barcelona

Barcelona, 2025

Agradecimientos

Agradezco profundamente al Dr. Manuel Fernández Garrido por su apoyo constante, guía científica y compromiso durante todo el proceso de investigación y redacción de esta tesis.

Extiendo mi gratitud al Dr. Jaume Masià Ayala y al Dr. Xavier León Vintró por su orientación experta y por brindarme la oportunidad de desarrollar este proyecto en un entorno académico de excelencia.

A la Dra. Gemma Pons, por facilitar el acceso a los casos clínicos y su colaboración generosa durante la fase quirúrgica.

Agradezco también a todo el equipo de cirugía reconstructiva, residentes y personal del quirófano que hicieron posible el trabajo de campo, así como a las pacientes que confiaron en el proceso.

Finalmente, gracias a mi familia y amigos, por su paciencia, comprensión y apoyo incondicional durante estos años.

Listado de abreviaturas

Abreviatura	Significado
DIEP	Deep Inferior Epigastric Perforator
ICG	Verde de Indocianina
TDI	Termografía Dinámica Infrarroja
NIRS	Espectroscopía del Infrarrojo Cercano
ROI	Región de Interés
AUC	Área Bajo la Curva
StO ₂	Saturación de Oxígeno Tisular
CTA	Angiotomografía Computarizada

Índice

Resumen.....	7
Abstract.....	10
1. Introducción.....	13
1.1. Fisiología de los colgajos libres.....	13
1.2 Anatomía quirúrgica y clasificación de los colgajos libres.....	16
1.2.1 Fundamentos anatómicos y definición de colgajo.....	16
1.2.2 Clasificación anatómica de los colgajos: estructura y vascularización.....	16
1.2.3 Evolución anatómica: del colgajo aleatorio al colgajo de perforantes.....	17
1.2.4 Anatomía vascular de los colgajos de perforantes.....	18
1.2.5 Angiosomas y territorio vascular en la planificación quirúrgica.....	19
1.3. Historia de la evaluación de la perfusión.....	20
1.4. Avances tecnológicos y evaluación comparativa.....	22
1.4.1. Angiografía con verde de indocianina (ICG):.....	22
1.4.2. Termografía dinámica infrarroja (TDI):.....	22
1.4.3. Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS).....	23
1.4.4. Comparación general y sinergia entre técnicas.....	23
1.5. Evaluación objetiva de la perfusión: ventajas y limitaciones de cada técnica.....	24
1.6. Justificación del estudio.....	25

1.7. Impacto clínico y económico de una evaluación precisa de la perfusión.....	26
1.8. Relevancia académica y proyección futura del estudio.....	27
2. Hipótesis.....	30
3. Objetivos.....	31
4. Materiales y Métodos.....	33
4.1. Diseño del estudio.....	33
4.2. Población y muestra.....	33
4.3. Procedimiento de medición.....	33
4.4. Análisis estadístico.....	34
4.5. Consideraciones éticas.....	34
4.6. Representación gráfica del estudio.....	35
4.7. Tabla resumen de mediciones.....	36
5. Resultados.....	37
5.1. Características de la muestra.....	37
5.2. Clasificación por angiografía con verde de indocianina (ICG).....	37
5.3. Análisis térmico global.....	38
5.4. Estadísticos descriptivos.....	38
5.5. Análisis ROC.....	39
5.6. Modelo estadístico.....	41
5.7. Subanálisis de zonas ICG = 1.....	43
5.8. Resultados preliminares con espectroscopía NIRS.....	44

5.9. Síntesis de resultados.....	44
5.10. Casos clínicos ilustrativos.....	45
6. Discusión.....	63
6.1. Interpretación global de los hallazgos clínicos.....	63
6.2. Comparación con la literatura.....	64
6.3. Aplicabilidad clínica de los umbrales térmicos.....	64
6.4. Discriminación intra-grupo en zonas ICG = 1.....	65
6.5. Rol del NIRS en reconstrucción microquirúrgica.....	65
6.6. Implicaciones clínicas y operativas.....	65
6.7. Evaluación del impacto en la toma de decisiones intraoperatorias	66
6.8. Limitaciones del estudio.....	67
6.9. Conclusión de la discusión.....	67
6.10. Reflexión personal del autor.....	69
6.11. Debate bibliográfico con autores clave.....	69
6.12. Implicaciones clínicas y aplicación futura del modelo.....	70
6.13. Modelo conceptual de integración fisiológica.....	70
6.14. Evaluación comparativa de precisión diagnóstica (AUC).....	71
7. Conclusiones.....	73
8. Líneas de futuro.....	76
9. Referencias bibliográficas.....	79

Resumen estructurado

Introducción

La reconstrucción mamaria con colgajos libres de perforantes, especialmente el colgajo DIEP, representa un pilar en la cirugía plástica reconstructiva. La viabilidad de estos colgajos depende críticamente de una adecuada perfusión tisular. Tradicionalmente, esta se ha valorado mediante criterios clínicos subjetivos, lo que limita la precisión diagnóstica, especialmente en pacientes con factores de riesgo vascular.

Justificación científica

La incorporación de herramientas objetivas como la termografía dinámica infrarroja (TDI), la angiografía con verde de indocianina (ICG) y la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) ha mejorado la evaluación intraoperatoria de la perfusión. Sin embargo, no existen estudios comparativos rigurosos que validen su rendimiento diagnóstico relativo ni su aplicabilidad combinada en reconstrucción con colgajos DIEP. Este estudio busca establecer un modelo cuantitativo y reproducible para optimizar la toma de decisiones quirúrgicas.

Hipótesis y objetivos

Se plantea que la TDI, la ICG y la NIRS permiten identificar zonas de hipoperfusión con alta sensibilidad y especificidad, y que su combinación mejora el valor diagnóstico respecto a su uso individual.

Los objetivos específicos fueron:

Evaluar la capacidad de la TDI para detectar zonas de riesgo.

Analizar la correlación entre TDI, ICG y NIRS.

Estimar umbrales térmicos predictivos mediante análisis ROC.

Determinar si estas tecnologías prolongan el tiempo quirúrgico.

Validar un modelo estadístico predictivo de hipoperfusión intraoperatoria.

Diseño del estudio

Tipo de intervención: Observacional

Temporalidad: Prospectivo

Comparación: Analítico comparativo

Ámbito: Clínico, intraoperatorio (pacientes humanas)

Registro: No aplicable (no intervención farmacológica)

Cálculo muestral: No se realizó un cálculo formal; el estudio tuvo carácter exploratorio.

Centro: Unicéntrico (hospital universitario terciario)

Resultados

Se incluyeron 22 colgajos DIEP en 24 pacientes, con un total de 72 regiones de interés analizadas. Las tres técnicas mostraron correlación significativa con los patrones de perfusión observados clínicamente.

- Las tres técnicas mostraron correlación significativa con los patrones de perfusión clínicos. Los valores diagnósticos obtenidos fueron: ICG AUC 0,92 (IC95%: 0,84–0,99), TDI ΔT 0,87 (IC95%: 0,78–0,96) y NIRS 0,88 (IC95%: 0,79–0,97).
- Las zonas con temperaturas <26 °C se asociaron a hipoperfusión (ICG = 0), mientras que >30 °C correspondieron a buena perfusión (ICG = 2).

- La NIRS mostró concordancia con los niveles de perfusión, aunque con menor resolución espacial.

No se registraron retrasos clínicamente relevantes en el tiempo quirúrgico al aplicar las tres técnicas.

Conclusiones

La evaluación combinada mediante TDI, ICG y NIRS permite una valoración objetiva, reproducible y complementaria de la perfusión en colgajos DIEP. La TDI destaca como una herramienta accesible y eficaz, especialmente en contextos con recursos limitados. La validación de umbrales cuantitativos mejora la toma de decisiones intraoperatorias y podría reducir complicaciones. Este estudio propone un modelo diagnóstico objetivo y aplicable a la práctica clínica, con potencial de estandarización y uso docente.

Abstract

Structured Abstract (English)

Introduction

Perforator-based free flaps, such as the Deep Inferior Epigastric Perforator (DIEP) flap, are a cornerstone in autologous breast reconstruction. Their success depends critically on adequate intraoperative tissue perfusion. Traditionally, this has been assessed using subjective clinical signs, which limits diagnostic precision, particularly in patients with vascular risk factors.

Scientific Justification

The incorporation of objective tools such as Indocyanine Green angiography (ICG), Dynamic Infrared Thermography (TDI), and Near-Infrared Spectroscopy (NIRS) has improved intraoperative perfusion assessment. However, there is a lack of comparative studies validating their diagnostic performance and combined use in DIEP flaps. This study aims to establish a reproducible, quantitative model to optimize surgical decision-making.

Hypothesis and Objectives

We hypothesize that TDI, ICG, and NIRS can reliably identify hypoperfused zones with high sensitivity and specificity, and that their combined use enhances diagnostic accuracy over individual application.

Specific objectives:

1. Assess the ability of TDI to detect perfusion deficits intraoperatively.
2. Analyze the correlation among TDI, ICG, and NIRS measurements.

3. Determine predictive thermal thresholds using ROC analysis.
4. Evaluate whether these technologies increase operative time.
5. Validate a statistical model to predict intraoperative hypoperfusion.

Study Design

- **Type of intervention:** Observational
- **Timeframe:** Prospective
- **Comparison:** Analytical
- **Setting:** Clinical, intraoperative (human patients)
- **Sample size calculation:** Not formally calculated; exploratory study
- **Center:** Single-center (university tertiary hospital)

Results

A total of 24 DIEP flaps were analyzed (72 regions of interest). All three techniques showed significant correlation with clinical perfusion patterns.

- The diagnostic performance was as follows: ICG AUC 0.92 (95% CI: 0.84–0.99), TDI ΔT 0.87 (95% CI: 0.78–0.96), and NIRS 0.88 (95% CI: 0.79–0.97).
- Areas with temperatures below 26 °C were associated with hypoperfusion (ICG = 0), whereas those above 30 °C corresponded to well-perfused regions (ICG = 2).
- No clinically relevant increase in operative time was observed when applying the three technologies.

Conclusions

The combination of ICG, TDI, and NIRS enables objective and reproducible assessment of DIEP flap perfusion. TDI proves to be an accessible and effective alternative, especially in low-resource environments. Validating quantitative thresholds improves

intraoperative decision-making and has the potential to reduce complications. This study proposes a diagnostic model applicable in routine clinical practice with potential for standardization and educational use.

1. Introducción

1.1. Fisiología de los colgajos libres

Los colgajos libres microquirúrgicos representan una de las técnicas más avanzadas en cirugía reconstructiva. Consisten en transferir un bloque tisular desvinculado de su lecho original, revascularizado mediante anastomosis microquirúrgicas a vasos receptores en la zona a reconstruir. A diferencia de los pediculados, no mantienen conexión vascular con su origen, lo que ofrece gran libertad de diseño y adaptación al defecto.

La viabilidad de un colgajo libre depende de la eficacia de su perfusión, determinada por la capacidad del sistema vascular receptor de aportar oxígeno y nutrientes y eliminar metabolitos. La microcirculación —arteriolas terminales, capilares y vénulas poscapilares— constituye el principal escenario de intercambio; su integridad es esencial para la supervivencia tisular (1–3).

Factores como el flujo arterial, la presión de perfusión, la vaso-reactividad y el drenaje venoso actúan de forma interdependiente. El desequilibrio genera hipoxia tisular reversible que, si se prolonga, evoluciona hacia disfunción endotelial, trombosis y necrosis (3,4). La densidad capilar anatómica depende del diseño del colgajo, mientras que la densidad funcional varía con factores locales y sistémicos (temperatura corporal, tensión arterial, uso de vasopresores, etc.). Su reducción altera el gradiente de oxígeno y predice isquemia subclínica (2,4). Asimismo, un incremento de la presión intersticial —por edema o compresión— puede colapsar capilares y obstaculizar la perfusión y el drenaje, iniciando un círculo vicioso que culmina en pérdida del colgajo (4,10).

En reconstrucción mamaria, el colgajo DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator) es técnica de referencia: aporta tejido autólogo bien vascularizado sin sacrificar el músculo recto abdominal. Su irrigación depende de perforantes de la arteria epigástrica inferior profunda, que atraviesan la fascia y el músculo hasta el tejido subcutáneo y dérmico. Este patrón tridimensional permite cubrir amplias áreas con un pedículo dominante (5,6).

La fisiología del DIEP está influida por la calidad de las perforantes y la lateralidad abdominal, con variaciones embriológicas en el flujo (5,6). La selección preoperatoria de perforantes mediante CTA y Doppler permite valorar calibre, trayecto y arborización, optimizando perfusión y reduciendo necrosis marginal (7,8).

Durante la disección es esencial preservar longitud e integridad del pedículo para facilitar anastomosis microvasculares con vasos receptores —habitualmente mamarios internos en reconstrucción mamaria— evitando angulaciones o compresiones que comprometan el flujo. La técnica microquirúrgica, con sutura o couplers, exige precisión para asegurar coaptación libre de tensión; pequeñas irregularidades pueden inducir trombosis (4,9).

El retorno venoso debe ser eficiente. La congestión, frecuente causa de pérdida parcial, puede prevenirse mediante drenaje complementario (p. ej., vena epigástrica superficial) o doble anastomosis venosa, especialmente en extremidades o cabeza y cuello (9).

Factores intraoperatorios (temperatura del quirófano, uso de vasopresores, manipulación vascular, antecedentes de radioterapia, hemoglobina, comorbilidades como diabetes o ateromatosis) condicionan la perfusión. En el postoperatorio influyen presión arterial, volemia, oxigenación, temperatura y estado de coagulación; la hipotermia induce vasoconstricción y trombosis (3,4). La compresión externa por apósticos o posición también compromete el flujo, por lo que se requiere vigilancia estrecha en las primeras 48 h (3).

En los días posteriores, el colgajo depende inicialmente del flujo anastomótico, pero progresivamente desarrolla inosculación con el lecho receptor. La hipoxia inicial estimula factores angiogénicos como VEGF, favoreciendo neovascularización e integración tisular (5–7).

En síntesis, la fisiología de los colgajos libres es un proceso dinámico y multifactorial. El conocimiento profundo de la perfusión y de los factores que la afectan permite un mejor diseño quirúrgico, decisiones intraoperatorias más seguras y un manejo postoperatorio que optimiza el éxito reconstructivo (1–9).

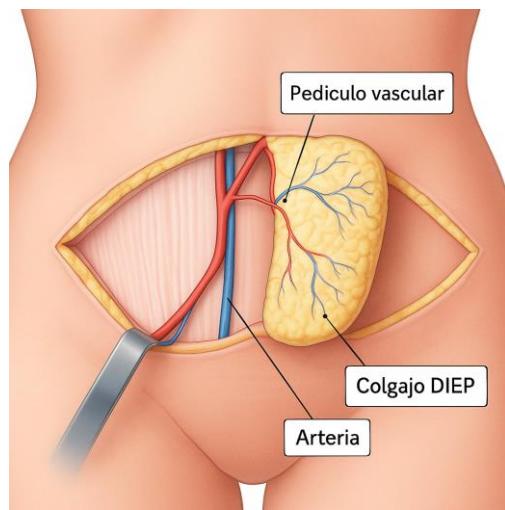


Figura 1. Se muestra el abordaje quirúrgico del colgajo DIEP en la región infraumbilical. El pedículo vascular —compuesto por arteria y venas epigástricas inferiores profundas— atraviesa el músculo recto abdominal, dando origen a una perforante dominante que irriga el tejido graso subcutáneo. Esta disposición anatómica permite preservar el músculo y optimizar la perfusión del colgajo.

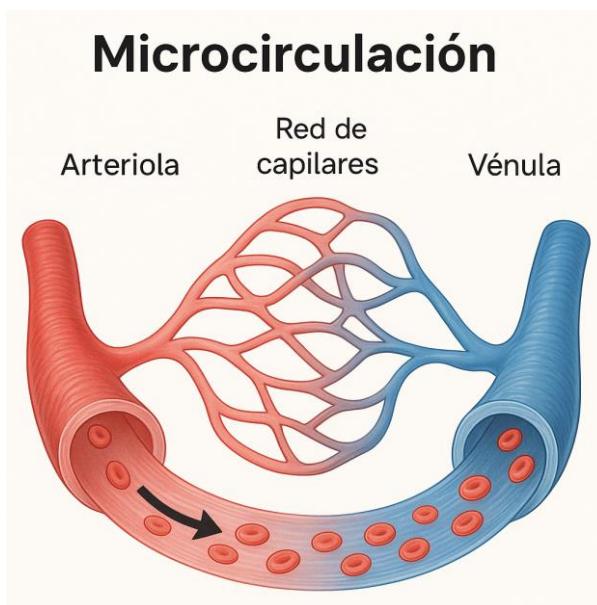


Figura 2. Esquema de la microcirculación en tejidos periféricos.

1.2 Anatomía quirúrgica y clasificación de los colgajos libres

1.2.1 Fundamentos anatómicos y definición de colgajo

El colgajo es una porción de tejido vivo (piel, tejido subcutáneo, fascia, músculo, hueso o víscera) transferida a otra localización manteniendo su perfusión mediante un pedículo propio o anastomosis microquirúrgicas. A diferencia del injerto, cuya viabilidad depende de la neovascularización del lecho, el colgajo conserva flujo continuo y permite volúmenes mayores y funciones estructurales y funcionales en reconstrucciones complejas [4].

La integridad hemodinámica del pedículo determina su viabilidad: la alteración del aporte arterial o drenaje venoso produce hipoxia, acidosis y necrosis. De ahí la relevancia de un conocimiento detallado de la anatomía vascular —arterial y venosa— para planificar y ejecutar colgajos, especialmente en microcirugía [4,6].

En colgajos basados en perforantes cutáneas (p. ej., DIEP o anterolateral de muslo), el diseño requiere una comprensión tridimensional del trayecto vascular y de la relación de las perforantes con estructuras vecinas para preservar el eje durante la disección [13].

1.2.2 Clasificación anatómica: estructura y vascularización

La clasificación ha evolucionado con el entendimiento vascular y el progreso técnico. Desde el punto de vista quirúrgico destacan dos ejes: composición tisular y patrón vascular.

a) Segundo su composición estructural

- Cutáneos: epidermis y dermis con TCS; útiles en defectos superficiales.
- Fasciocutáneos: piel, TCS y fascia profunda; mejor biomecánica y vascularización que los cutáneos simples.

- Musculares: aportan volumen y se adaptan a zonas contaminadas o irradiadas.
 - Miocutáneos: músculo + piel irrigados por perforantes; frecuentes en reconstrucciones tridimensionales.
 - Óseos/osteocutáneos: esenciales en reconstrucción máxilofacial, mandibular o de extremidades.
 - Viscerales: segmentos de órganos (yeyuno, colon, epiplón) para reconstrucciones profundas.
 - Químéricos: múltiples islotes (piel/músculo/hueso) irrigados por ramas de un mismo pedículo, con gran versatilidad [4,5].
- b) Segundo según su irrigación vascular
- Aleatorios: dependen de plexos subdérmicos; requieren base ancha y se limitan a defectos pequeños/medianos [4].
 - Axiales: irrigados por un vaso principal de trayecto predecible; supusieron un salto de seguridad [4,5].
 - Libres microquirúrgicos: transferidos con anastomosis arteriales y venosas, con máxima libertad de diseño en reconstrucción compleja [6]. Comprender estas categorías permite seleccionar el colgajo adecuado, anticipar complicaciones y planificar estrategias de rescate, clave en la reconstrucción personalizada.

1.2.3 Evolución: del colgajo aleatorio al colgajo de perforantes

La historia del colgajo ha pasado de un enfoque empírico a una disciplina basada en datos anatómicos y fisiológicos.

En la primera mitad del siglo XX predominaron los colgajos aleatorios, con limitaciones por su dependencia del plexo dérmico (alcance y fiabilidad distales) [4]. El primer gran cambio fue la descripción de colgajos axiales irrigados por arterias constantes, gracias a la cartografía vascular de Manchot, Salmon y Taylor (p. ej., radial, dorsal ancho, recto anterior) [4,5].

El segundo hito fue la microcirugía en los años setenta, que permitió los colgajos libres completamente desvinculados del sitio donante, con libertad de volumen y orientación

para reconstrucciones complejas en cabeza y cuello, mama y extremidades [6]. Para reducir la morbilidad del sitio donante asociada a músculos u hueso, surgió el colgajo de perforantes, irrigado por vasos perforantes que emergen desde un eje profundo hacia la piel, preservando estructuras profundas y disminuyendo secuelas [4]. Estudios de Taylor y Nakajima definieron trayectos y territorios de perforantes (musculares, septales, fasciocutáneas) y consolidaron el concepto de perforante dominante (DIEP, ALT, SGAP) [4,6,13].

El DIEP ejemplifica esta evolución frente al TRAM: al preservar el recto abdominal mediante la selección de perforantes de la epigástrica inferior profunda, reduce dolor, debilidad de la pared y acelera la recuperación [6,7]. La planificación preoperatoria con MDCT y Doppler permite localizar número, calibre y trayecto de perforantes, optimizando resultados y reduciendo complicaciones y tiempo quirúrgico [13]. En suma, la evolución refleja el tránsito hacia diseños especializados y personalizados que maximizan eficacia reconstructiva con mínima agresión, sustentados por anatomía vascular, imagen y refinamiento microquirúrgico.

1.2.4 Anatomía vascular de los colgajos de perforantes

Los colgajos basados en perforantes permiten cobertura eficaz con mínima morbilidad al prescindir de estructuras profundas cuando no son necesarias [4,6]. Una perforante es la rama que parte de un eje axial y alcanza el tejido subcutáneo y la piel atravesando (o rodeando) planos fasciales, septos o músculo. Su trayecto puede ser intramuscular, septal o subfascial; posibilitan colgajos sin sacrificar músculo u hueso [4,13].

Nakajima et al. propusieron una clasificación funcional en seis tipos agrupables en:

- Directas/puras: atraviesan fascia o septos sin irrigar estructuras intermedias; útiles en colgajos fasciocutáneos.
- Indirectas/impuras: atraviesan e irrigan músculo antes de la piel; típicas del DIEP [4].

En el DIEP, las perforantes provienen de la arteria epigástrica inferior profunda (AEIP),

rama de la ilíaca externa. Tras penetrar el recto abdominal, algunas emergen en piel y permiten un colgajo cutáneo preservando el músculo. Su variabilidad individual exige localización preoperatoria personalizada [13].

La imagen (MDCT, angio-TC) muestra que la perforante dominante no siempre es la más superficial o céntrica, por lo que la planificación basada en imagen minimiza vasoespasmo, necrosis parcial y conversiones a colgajos con músculo [13].

El sistema venoso acompañante es crítico: el fallo venoso favorece congestión y necrosis parcial; su variabilidad requiere disección cuidadosa y, a veces, doble anastomosis venosa [6].

Funcionalmente, las perforantes permiten preservar el recto (DIEP) o el vasto lateral (ALT), reduciendo dolor, debilidad y tiempo de recuperación, en línea con la cirugía mínimamente invasiva reconstructiva [6,7].

Intraoperatoriamente, la identificación y confirmación de perfusión puede apoyarse en Doppler de alta frecuencia, TDI e ICG, optimizando la selección del diseño [6,13]. En conjunto, la anatomía arterial y venosa de las perforantes es indispensable para una reconstrucción segura y personalizada, consolidando a estos colgajos como estrategia sofisticada de reconstrucción autóloga.

1.2.5 Angiosomas y territorio vascular en la planificación

Taylor y Palmer (1987) introdujeron el angiosoma como unidad tridimensional irrigada por una arteria nutricia principal y venas satélites, que incluye todos los tejidos del volumen (piel, TCS, fascia, músculo y, a veces, hueso) [4].

Existen >40 angiosomas mayores interconectados por choke vessels, anastomosis dinámicas que permiten la redistribución del flujo tras cambios en territorios adyacentes. Se distinguen:

- Territorio estático: área perfundida directamente por el pedículo; mayor fiabilidad.
- Territorio dinámico: regiones adyacentes incorporables por vasodilatación/neovascularización o manipulación de vasos de choque.

- Territorio potencial: zonas periféricas de perfusión límite, sensibles a presión de perfusión, tono vasomotor y condiciones sistémicas [4].

Estos principios permiten maximizar cobertura sin comprometer viabilidad distal en colgajos grandes/compuestos. En el DIEP, el territorio estático corresponde a la piel irrigada por las perforantes seleccionadas de la AEIP; el dinámico puede extenderse a suprapúbica o flancos vía colaterales [6].

El concepto de angiosomas guía el punto de pivote, el diseño de la isla cutánea y la evaluación intraoperatoria. También contextualiza la ICG, que visualiza en tiempo real el flujo dentro de angiosomas y delimita zonas hipoperfundidas [6,13]. Su manipulación implica riesgos (isquemia distal, congestión, necrosis parcial) si se sobrepasan límites vasculares; conocer patrones de perfusión y conexiones interangiosómicas permite expandir el colgajo con seguridad, planificar extensiones o realizar procedimientos de delay [4,6].

Así, el enfoque por angiosomas ofrece una herramienta anatómico-funcional para diseñar colgajos con precisión, anticipar complicaciones y adaptarse a la variabilidad interindividual. Hoy se complementa con TDI, NIRS y angio-TAC, consolidando una cirugía guiada por perfusión.

1.3 Historia de la evaluación de la perfusión

Tradicionalmente, la perfusión en colgajos libres se evaluó con signos clínicos subjetivos (color, sangrado, temperatura, turgencia), útiles pero con alta variabilidad interobservador y baja sensibilidad para hipoperfusión subclínica, especialmente en irradiados o con vasculopatía (14). Aunque útiles, estos signos dependen de la experiencia y carecen de parámetros objetivos medibles.

Para superar estas limitaciones, surgieron métodos más objetivos. La fluoresceína sódica permitió observar difusión bajo UV, pero con baja especificidad/reproducibilidad y efectos adversos (náuseas, necrosis por extravasación), lo que limitó su uso (14,17).

El Doppler continuo supuso un avance al detectar flujo en tiempo real, aunque sin informar la calidad de perfusión distal; el Doppler implantable mejoró la vigilancia postoperatoria pero generó falsos positivos por turbulencias o flujos parciales (14). La necesidad de objetivar y localizar espacialmente la perfusión condujo a tecnologías de imagen. La angiografía con verde de indocianina (ICG), adaptada desde oftalmología y cardiología, visualiza en tiempo real la perfusión capilar superficial tras la inyección intravenosa de un colorante que emite fluorescencia bajo luz infrarroja (11–13). Estudios prospectivos y revisiones han mostrado que la ICG detecta precozmente hipoperfusión y anticipa necrosis, especialmente en DIEP; además, permite registrar imágenes y establecer umbrales cuantificables (intensidad, tiempo a pico), mejorando reproducibilidad y comparabilidad (12,13,15).

La termografía dinámica infrarroja (TDI) es accesible, sin contacto, inocua y económica. Mide la recuperación térmica tras estímulo frío: recuperación rápida sugiere buena perfusión; persistencia de zonas frías anticipa isquemia. De Weerd demostró su aplicabilidad intraoperatoria y postoperatoria precoz en DIEP y SIEA (1,2). Un metaanálisis de Ries et al. confirmó su sensibilidad diagnóstica para hipoperfusión frente a ICG, con valor añadido en centros sin tecnologías de alto coste (3).

La NIRS añade una dimensión cuantitativa y continua: sondas superficiales miden la StO₂ (equilibrio HbO₂/Hb desoxigenada), correlacionándose con trombosis incipiente y detectando fallos venosos antes de los signos clínicos (5–8). Revisiones como las de Festa y Newton validan la utilidad de NIRS en reconstrucciones complejas (cabeza y cuello); la monitorización continua reduce tiempos de respuesta y eleva las tasas de salvamento (9,10).

En las dos últimas décadas, estas tecnologías han pasado de ser complementarias a integrarse como estándar en la evaluación de perfusión. Su incorporación a protocolos y formación ha mejorado la precisión diagnóstica, reducido la necrosis y favorecido una reconstrucción más precisa y basada en evidencia. En conjunto, la evolución ha llevado

desde la observación subjetiva hacia la integración sistemática de métodos cuantificables como ICG, TDI y NIRS (11–15).

1.4. Avances tecnológicos y evaluación comparativa

La incorporación de métodos objetivos ha transformado la evaluación perfusional en colgajos libres, permitiendo detectar zonas isquémicas, optimizar el diseño y reducir complicaciones. Entre las técnicas más empleadas destacan la angiografía con verde de indocianina (ICG), la termografía dinámica infrarroja (TDI) y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), cada una con aportes diferenciales y complementarios.

1.4.1 Angiografía con verde de indocianina (ICG)

La ICG se ha consolidado como técnica de referencia para valorar la perfusión capilar superficial en tiempo real. Tras inyección intravenosa, el colorante se une a proteínas plasmáticas y fluoresce bajo luz infrarroja, generando imágenes dinámicas que identifican áreas hipoperfundidas antes de la necrosis (11–13). Su uso en colgajos DIEP ha reducido complicaciones y guiado decisiones intraoperatorias (12,13). Entre sus limitaciones destacan el coste elevado, la necesidad de personal entrenado y la imposibilidad de múltiples mediciones por acumulación de contraste. La interpretación sigue siendo parcialmente subjetiva si no se aplican criterios cuantitativos estandarizados (14,15).

1.4.2 Termografía dinámica infrarroja (TDI)

La TDI es una alternativa no invasiva y de bajo coste, basada en la recuperación térmica tras un estímulo de enfriamiento. Genera mapas térmicos que reflejan indirectamente la perfusión (1,2). Ha mostrado utilidad intra y postoperatoria, con alta sensibilidad en colgajos DIEP y SIEA (2,3). Sus ventajas son portabilidad, rapidez y ausencia de contraste, aunque su precisión puede verse afectada por factores ambientales y requiere experiencia en interpretación (3).

1.4.3 Espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS)

La NIRS mide de manera continua la saturación tisular de oxígeno (StO_2), siendo especialmente útil en monitorización postoperatoria (5–8). Detecta eventos de trombosis o congestión antes de los signos clínicos y facilita un seguimiento temprano sin manipular el colgajo (5,6). Sus limitaciones incluyen baja resolución espacial y dependencia del correcto posicionamiento de las sondas; su interpretación se basa en tendencias más que en valores absolutos (7–10).

1.4.4 Comparación y sinergia

Cada técnica es útil en fases distintas: la ICG aporta un mapa dinámico intraoperatorio; la TDI, portable y accesible, permite evaluación funcional repetida; la NIRS ofrece monitorización continua postoperatoria. Su uso combinado maximiza sensibilidad y especificidad diagnóstica, reduciendo necrosis marginal y aumentando la tasa de salvamento en reintervenciones. En centros sin ICG, la TDI representa una alternativa eficaz, y la NIRS suple la falta de vigilancia continua.

Una limitación común es la falta de estandarización de umbrales cuantitativos (fluorescencia, gradientes térmicos, StO_2), lo que dificulta la comparación entre estudios. Actualmente se investigan algoritmos de inteligencia artificial para identificar patrones predictivos. También se desarrollan dispositivos híbridos portátiles que integran sensores ópticos, cámaras térmicas y espectroscopía, con el fin de facilitar la toma de decisiones en tiempo real y ampliar el acceso a una cirugía reconstructiva de precisión.

En síntesis, la integración racional de ICG, TDI y NIRS representa un avance hacia una cirugía más objetiva, segura y personalizada. Aunque cada técnica tiene limitaciones, su aplicación combinada fortalece el diagnóstico, y el futuro apunta a la fusión tecnológica y la estandarización de protocolos para optimizar los resultados clínicos y estéticos.

1.5. Evaluación objetiva de la perfusión: ventajas y limitaciones de cada técnica

La evaluación precisa de la perfusión en colgajos libres es crucial, ya que la detección temprana de hipoperfusión previene complicaciones y mejora resultados. Los parámetros clínicos clásicos (color, temperatura, sangrado tras punción, tiempo de relleno capilar) siguen siendo útiles, pero son subjetivos y dependientes de la experiencia del cirujano [10,16].

En respuesta, se han incorporado métodos objetivos como la angiografía con verde de indocianina (ICG), la termografía dinámica infrarroja (TDI) y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS), que permiten una valoración más reproducible.

La ICG genera imágenes dinámicas de perfusión tras inyección intravenosa, identificando áreas hipoperfundidas antes de su expresión clínica [17,19]. Ha demostrado utilidad para modificar intraoperatoriamente el diseño del colgajo, aunque su alto coste y necesidad de equipamiento especializado limitan su uso rutinario [13].

La TDI se presenta como alternativa accesible, no invasiva y sin contraste. Tras un estímulo de enfriamiento, permite diferenciar zonas bien irrigadas de áreas hipóxicas mediante mapas térmicos [11,14]. Estudios han confirmado su correlación con ICG, apoyando su validez como herramienta complementaria [17,18].

La NIRS, mediante sondas ópticas, mide continuamente la saturación de oxígeno tisular (StO_2), detectando fenómenos de trombosis o congestión venosa antes de signos clínicos [17,20]. Su simplicidad y aplicabilidad en el postoperatorio la hacen especialmente útil, aunque evalúa áreas muy localizadas y depende del posicionamiento de las sondas.

Estas tecnologías también han sido aplicadas en colgajos ALT, fibular y de escápula, así como en reconstrucciones de extremidades y cabeza y cuello [17,20]. En pacientes con comorbilidades vasculares o irradiación previa, su valor es aún mayor, ya que identifican alteraciones que la exploración clínica puede pasar por alto [3,14].

Además, aportan beneficios en la formación quirúrgica, al permitir criterios objetivos y estandarizables, reduciendo la variabilidad interobservador. Algunas publicaciones proponen incluso protocolos docentes que incluyen ICG y TDI [11,17].

Un desafío pendiente es la definición de umbrales cuantitativos (fluorescencia, gradientes térmicos, StO₂) que orienten decisiones intraoperatorias y comparen resultados entre centros [19,20]. En esta línea, se exploran sistemas híbridos con inteligencia artificial para fusionar datos y predecir riesgo de necrosis con mayor sensibilidad [18].

En conclusión, la integración de ICG, TDI y NIRS aporta una evaluación objetiva que complementa la valoración clínica tradicional. Su uso sistemático favorece protocolos reproducibles, estandariza la formación y abre la puerta a algoritmos predictivos de decisión quirúrgica. Estos avances representan un paso hacia una cirugía reconstructiva más precisa, segura y basada en evidencia [11,13,20].

1.6. Justificación del estudio

A pesar de los avances en cirugía microquirúrgica, las complicaciones derivadas de la hipoperfusión siguen siendo una causa importante de fracaso parcial o total en reconstrucciones con colgajos libres. La necrosis marginal, la infección o la necesidad de reintervenciones impactan negativamente en el resultado funcional y estético, aumentan la carga emocional del paciente y generan un elevado coste asistencial [10,13].

La angiografía con verde de indocianina (ICG) ha demostrado eficacia en la detección precoz de zonas hipoperfundidas; sin embargo, su disponibilidad se limita a centros con recursos tecnológicos avanzados. Esto crea un dilema en instituciones con presupuestos restringidos. Frente a esta realidad, la termografía dinámica infrarroja (TDI) y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) se plantean como alternativas más accesibles, no invasivas y de bajo coste, con potencial para integrarse en la práctica clínica habitual. No obstante, su adopción a gran escala requiere estudios comparativos rigurosos que confirmen sensibilidad, especificidad y utilidad clínica real.

El presente estudio propone comparar sistemáticamente ICG, TDI y NIRS en reconstrucción mamaria con colgajo DIEP. Se pretende analizar su rendimiento diagnóstico y establecer correlaciones entre hallazgos intraoperatorios y resultados postoperatorios a corto y medio plazo. La evaluación de parámetros como la recuperación térmica, los valores de saturación de oxígeno o la intensidad de fluorescencia permitirá

definir umbrales cuantitativos que faciliten la toma de decisiones intraoperatorias, estandaricen protocolos y anticipen complicaciones.

La validación de estas tecnologías tiene una implicación directa en la mejora de resultados clínicos y en la optimización de recursos sanitarios, al reducir reintervenciones y costes asociados. Desde una perspectiva investigadora, ofrece la oportunidad de generar evidencia sólida para guías clínicas basadas en datos, aún escasas y fragmentadas en la literatura actual.

Finalmente, la introducción de herramientas accesibles como TDI y NIRS también puede potenciar su uso en la docencia quirúrgica, facilitando a residentes y cirujanos jóvenes el aprendizaje de criterios objetivos de perfusión. Su integración en programas formativos y sistemas digitales con inteligencia artificial abre la puerta a una cirugía reconstructiva más estandarizada, precisa y equitativa, incluso en entornos con recursos limitados.

1.7. Impacto clínico y económico de una evaluación precisa de la perfusión

Las complicaciones derivadas de una perfusión deficiente —necrosis marginal, dehiscencia, infección y reintervenciones— siguen siendo un problema relevante en reconstrucción con colgajos libres, con consecuencias negativas en el resultado funcional y estético y un alto impacto asistencial y emocional [10,13].

La angiografía con verde de indocianina (ICG) ha demostrado utilidad para identificar zonas hipoperfundidas [11–13], pero su coste y la necesidad de equipamiento avanzado restringen su uso generalizado. En contraste, la TDI y la NIRS representan alternativas accesibles, no invasivas y más fáciles de integrar en la práctica clínica [1–3,5–8], aunque requieren validación comparativa antes de su adopción masiva [3,7,10].

Una evaluación objetiva de la perfusión no solo mejora la seguridad clínica, sino que también optimiza recursos sanitarios: al reducir reintervenciones, se liberan quirófanos, camas y personal, disminuyendo costes y aumentando la sostenibilidad de los sistemas de salud [7,10,13].

En el ámbito académico, la estandarización de umbrales cuantitativos —fluorescencia, gradientes térmicos, saturación de oxígeno— facilitará la creación de protocolos reproducibles y estudios multicéntricos [11,14,19,20]. Además, su aplicación docente fomenta la formación objetiva de residentes y cirujanos jóvenes, reduciendo la variabilidad interobservador [2,3,6,11].

Finalmente, el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial y plataformas digitales para analizar datos perfusionales abre una proyección futura hacia una cirugía más personalizada y de precisión, con beneficios tanto clínicos como económicos [18,20].

1.8. Relevancia académica y proyección futura del estudio

Este estudio contribuye significativamente a la creciente literatura científica centrada en la evaluación objetiva de la perfusión en cirugía reconstructiva. La necesidad de superar las limitaciones inherentes a la evaluación clínica subjetiva ha impulsado la investigación en herramientas complementarias que integren datos cuantificables y reproducibles. En este contexto, la comparación sistemática entre técnicas como la angiografía con verde de indocianina (ICG), la termografía dinámica infrarroja (TDI) y la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) representa un aporte sustancial al conocimiento actual [1–3,5,6,10–13]. Este análisis comparativo, basado en parámetros fisiológicos contrastados y en correlaciones con resultados clínicos reales, permite establecer una base científica sólida que orienta la selección tecnológica en función del contexto hospitalario, la disponibilidad de recursos y el perfil del paciente [3,5,6,11].

La utilidad de estos hallazgos no se limita al ámbito de la reconstrucción mamaria con colgajo DIEP. Por el contrario, existe un amplio potencial de extrapolación hacia otras áreas de la cirugía plástica, como la reconstrucción facial microvascular, la cobertura de defectos complejos en extremidades inferiores o la reconstrucción postraumática de tejidos blandos [5,6,10]. En estos escenarios, donde los desafíos de perfusión son

similares, la validación de tecnologías accesibles podría permitir una mejor planificación quirúrgica, disminuir la tasa de complicaciones y aumentar la tasa de éxito reconstructivo [7,13,17].

Asimismo, el desarrollo de umbrales cuantificables —como valores de recuperación térmica, tasas de oxigenación mínima o intensidad fluorescente— abre la posibilidad de crear algoritmos clínicos estructurados que sirvan de guía durante el acto quirúrgico [14,19,20]. Estos algoritmos pueden actuar como herramientas de apoyo a la decisión quirúrgica, especialmente valiosas para profesionales en formación o para equipos multidisciplinares que trabajen en contextos de alta presión asistencial. La incorporación de estos algoritmos en protocolos estandarizados no solo mejora la reproducibilidad de los procedimientos, sino que también facilita auditorías clínicas, formación continua y evaluación de calidad asistencial [14,18].

Desde una perspectiva académica, el presente estudio también puede impulsar líneas futuras de investigación centradas en la integración tecnológica. En particular, el diseño de sistemas híbridos que combinen en tiempo real datos de TDI, ICG y NIRS —mediante plataformas de inteligencia artificial o software de fusión de imágenes— podría representar una evolución significativa en la monitorización intraoperatoria [11,18]. Esta integración permitiría detectar de forma más precisa zonas de riesgo, personalizar las decisiones quirúrgicas según la fisiología específica del colgajo y aumentar la predictibilidad de los resultados [20].

Además, los resultados de esta investigación podrían sentar las bases para el desarrollo de nuevas generaciones de dispositivos portátiles, económicos y de bajo consumo, lo que facilitaría su uso no solo en quirófanos, sino también en entornos ambulatorios, en consultas externas o durante el seguimiento postoperatorio en pacientes con factores de riesgo [8,11]. La portabilidad y simplicidad operativa ampliarían el alcance de estas

tecnologías, adaptándolas a contextos rurales, servicios de salud domiciliaria e incluso programas de cooperación internacional en países con recursos limitados [7,17].

La estandarización de estas herramientas también puede integrarse en estrategias docentes, incorporando módulos de evaluación perfusional objetiva en los programas de formación quirúrgica. Esto permitiría que los cirujanos en formación desarrollen desde etapas tempranas habilidades críticas en la interpretación de datos fisiológicos, mejorando su criterio clínico y promoviendo una cultura basada en evidencia [2,3,6,11].

Finalmente, a medida que se acumule evidencia de alta calidad, los resultados podrán ser considerados en guías clínicas internacionales, promoviendo la equidad en el acceso a procedimientos reconstructivos seguros y eficientes. Esta democratización tecnológica contribuirá a cerrar brechas asistenciales y a garantizar que la elección de una técnica reconstructiva no dependa del contexto económico del paciente, sino de criterios objetivos, reproducibles y basados en evidencia [6,10,13,20].

En definitiva, esta tesis doctoral no solo busca responder preguntas clínicas relevantes, sino también impulsar un cambio de paradigma hacia una cirugía reconstructiva más tecnológica, objetiva y basada en evidencia. Al validar métodos accesibles, adaptables y escalables, se promueve una medicina quirúrgica más equitativa, donde la calidad no dependa exclusivamente de la disponibilidad tecnológica, sino de la capacidad de utilizar de forma eficiente las herramientas adecuadas para cada paciente y cada contexto [11,13,20].

2. Hipótesis

- La termografía dinámica infrarroja (TDI) es capaz de identificar de forma fiable las zonas de hipoperfusión en colgajos libres con una sensibilidad comparable a la ICG.
- Existe una correlación positiva y significativa entre las temperaturas registradas por TDI, la intensidad de fluorescencia por ICG y los niveles de oxigenación tisular medidos por NIRS.
- El uso combinado de TDI, ICG y NIRS mejora la precisión diagnóstica en la evaluación de colgajos libres en comparación con el uso individual de cada técnica.
- La integración de múltiples herramientas de imagen no prolonga significativamente el tiempo operatorio ni compromete la seguridad quirúrgica.
- El modelo estadístico mixto basado en datos combinados de TDI e ICG predice de forma eficaz las zonas no viables del colgajo con una precisión clínicamente aceptable.

3. Objetivos

El presente estudio se enmarca en la necesidad creciente de mejorar la precisión en la evaluación intraoperatoria de la perfusión de los colgajos libres, especialmente los colgajos libres de perforantes en cirugía reconstructiva. Esto es debido a que los colgajos libres de perforantes como el colgajo DIEP, aunque tienen un perfosoma definido, presentan muchas variaciones individuales en las zonas de perfusión que los colgajos libres tradicionales. Requieren una valoración cuidadosa de su viabilidad en tiempo real para minimizar riesgos de necrosis parcial o total. En este contexto, tecnologías como la termografía dinámica infrarroja (TDI), la angiografía con verde de indocianina (ICG) y la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS) han surgido como herramientas de apoyo complementario al juicio clínico. A pesar de su uso creciente, existen aún dudas sobre su fiabilidad comparativa, sus limitaciones prácticas y su aplicabilidad en distintos entornos quirúrgicos, tal y como se ha detallado en el apartado de introducción.

Este trabajo plantea una serie de objetivos concretos que permitirán evaluar de forma estructurada y cuantitativa la utilidad de estas técnicas en la práctica clínica habitual. Asimismo, se formulan hipótesis basadas en hallazgos previos que servirán como punto de partida para validar un modelo diagnóstico reproducible.

Objetivo principal: Evaluar la utilidad comparativa de la termografía dinámica infrarroja (TDI), la angiografía con verde de indocianina (ICG) y la espectroscopía infrarroja cercana (NIRS) para la valoración intraoperatoria de la perfusión en colgajos libres de perforantes utilizados en reconstrucción mamaria.

Objetivos secundarios:

- Determinar la capacidad de la TDI para identificar zonas de hipoperfusión en colgajos libres durante el proceso quirúrgico, evaluando si esta tecnología

permite, mediante patrones térmicos dinámicos, predecir áreas con riesgo de necrosis de manera precoz.

- Comparar la concordancia y el valor diagnóstico de TDI, ICG y NIRS en la valoración intraoperatoria de la perfusión, analizando sensibilidad, especificidad y umbrales térmicos predictivos mediante análisis ROC.
- Valorar el impacto logístico de la integración de tecnologías de imagen intraoperatoria (TDI, ICG y NIRS) en la práctica quirúrgica, con énfasis en el tiempo operatorio y su aplicabilidad en la rutina clínica.
- Desarrollar y validar un modelo estadístico predictivo de hipoperfusión intraoperatoria, que integre los parámetros obtenidos por TDI, ICG y NIRS, con el fin de generar una herramienta objetiva que optimice la toma de decisiones intraoperatorias.

4. Materiales y Métodos

4.1. Diseño del estudio

Se realizó un estudio observacional, prospectivo y comparativo en pacientes sometidas a reconstrucción mamaria con colgajos DIEP en un hospital universitario de referencia, entre enero y noviembre de 2020. El diseño fue elegido para evaluar, en condiciones reales de práctica clínica, la aplicabilidad y desempeño de tres herramientas de imagen intraoperatoria: la termografía dinámica infrarroja (TDI), la angiografía con verde de indocianina (ICG) y la espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS).

4.2. Población y muestra

Se incluyeron pacientes adultas candidatas a reconstrucción mamaria inmediata o diferida mediante colgajos DIEP. Se excluyeron casos con antecedentes de radioterapia reciente, infecciones locales o imposibilidad técnica de aplicar alguna de las tecnologías. El tamaño muestral final fue de 24 colgajos analizados en 22 pacientes, con tres regiones de interés (ROIs) por colgajo.

4.3. Procedimiento de medición

- **Termografía dinámica infrarroja (TDI):** se utilizó una cámara portátil FLIR E6 (FLIR Systems®), colocada a 50 cm sobre el colgajo. Tras aplicación de frío mediante instrumental quirúrgico estéril (batea metálica) a temperatura de 21 °C durante 30 segundos, se extrajeron imágenes térmicas a los 2 y 10 minutos. El análisis se realizó con FLIR Tools, evaluando la temperatura en las ROIs identificadas según las zonas de mayor o menor perfusión observadas en la angiografía con ICG (zonas grises o brillantes). Dos evaluadores independientes realizaron las mediciones por duplicado.

- **Angiografía con verde de indocianina (ICG):** Se administró ICG a dosis de 0,25 mg/kg por vía intravenosa, y se capturó la fluorescencia con el sistema Fluobeam® (Fluoptics®). Se clasificó la perfusión en tres niveles: intensa, intermedia y tenue o ausente.
- **Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS):** mediante el equipo INVOS® 5100C (Medtronic®), se registró la oxigenación tisular (StO_2) durante 60 segundos por ROI, con dos mediciones por zona.

Todas las mediciones se realizaron en un quirófano a 21 ± 1 °C, sin otras fuentes de calor o frío, y se completaron en aproximadamente 10 minutos por paciente.

4.4. Análisis estadístico

Los datos fueron registrados en Excel y analizados con R (versión 4.3.1). Se realizaron pruebas de normalidad y homocedasticidad, ANOVA de medidas repetidas, pruebas de Tukey, correlaciones de Spearman y curvas ROC. Se utilizó un modelo lineal mixto para ajustar por paciente como efecto aleatorio. Se consideró significación estadística $p < 0,05$.

4.5. Consideraciones éticas

El estudio fue aprobado por el Comité Ético del hospital, con consentimiento informado firmado. Se siguieron los principios de la Declaración de Helsinki (Fortaleza, 2013) y las normativas de protección de datos (RGPD, UE 2016/679).

4.6. Representación gráfica del estudio

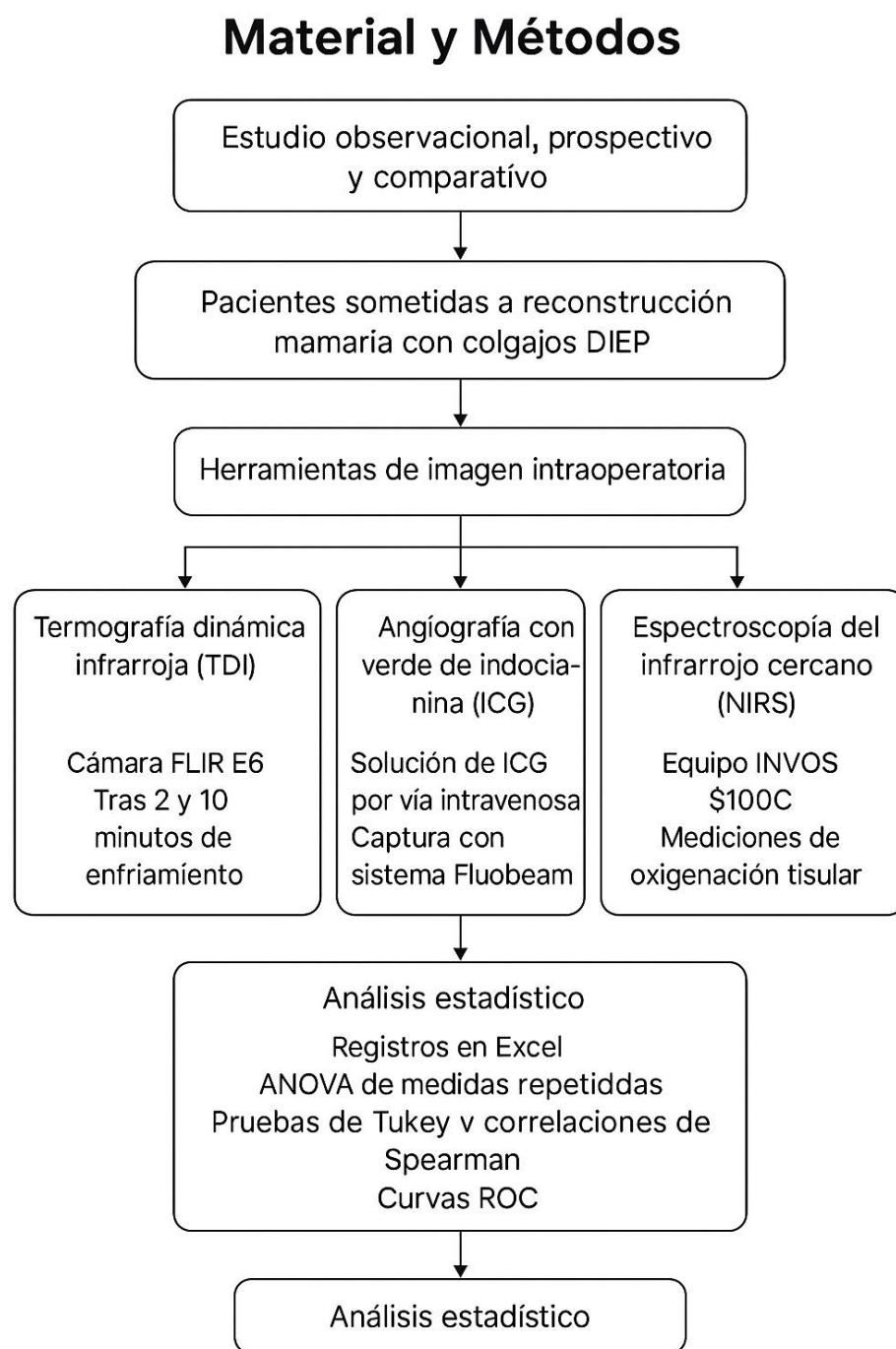


Figura 3 Diagrama de flujo del estudio: diseño, población, técnicas de medición y análisis estadístico.

Representación esquemática del proceso metodológico seguido en el estudio, desde la selección de pacientes hasta el análisis estadístico de los datos recogidos mediante termografía dinámica infrarroja (TDI), angiografía con verde de indocianina (ICG) y espectroscopía NIRS.

4.7. Tabla resumen de mediciones

Tabla 1. Comparativa de técnicas de imagen intraoperatoria

Técnica	Parámetros evaluados	Tiempo de aplicación	Instrumento utilizado	Duración por ROI	Número de mediciones
TDI	Temperatura superficial en °C	2 y 10 minutos post-enfriamiento	Cámara FLIR E6 + FLIR Tools	Instantáneo	2 por ROI (duplicadas)
ICG	Fluorescencia (visual y cuantitativa)	Inmediato y tras inyección	Fluobeam® (Fluoptics®)	2–3 minutos	1 por ROI
NIRS	Saturación de oxígeno tisular (StO ₂ , %)	Medición directa	INVOS® 5100C 60 (Medtronic®)	segundos	2 por ROI

5. Resultados

5.1. Características de la muestra

Se incluyeron 22 pacientes sometidas a reconstrucción mamaria con colgajo DIEP entre los años 2020 y 2022. En total se analizaron 24 colgajos, cada uno dividido en tres regiones de interés (ROIs), lo que dio un total de 72 mediciones evaluadas mediante termografía dinámica infrarroja (TDI), angiografía con verde de indocianina (ICG) y espectroscopía infrarroja cercana (NIRS). Todas las pacientes fueron intervenidas en el mismo centro hospitalario, bajo condiciones estandarizadas de temperatura ambiental, técnica quirúrgica, mismo equipo quirúrgico y evaluación intraoperatoria.

5.2. Clasificación por angiografía con verde de indocianina (ICG)

Las ROIs fueron clasificadas visualmente en tres categorías de perfusión según la intensidad de fluorescencia captada por el sistema Fluobeam® tras la administración intravenosa de ICG a dosis de 0,25 mg/kg. Las categorías fueron definidas de la siguiente manera:

- **ICG = 0:** zonas no perfundidas (fluorescencia ausente)
- **ICG = 1:** zonas hipoperfundidas (fluorescencia tenue o intermedia)
- **ICG = 2:** zonas bien perfundidas (fluorescencia intensa y precoz)

Esta clasificación sirvió como referencia estándar para el análisis comparativo con TDI y NIRS.

5.3. Análisis térmico global

Las imágenes térmicas fueron obtenidas con una cámara infrarroja FLIR E6 posicionada a 50 cm del colgajo, 10 minutos después de la aplicación de un estímulo frío mediante batea metálica estéril a 21 °C durante 60 segundos.

Se observó una correlación clara entre la temperatura superficial del colgajo y la clasificación ICG. Las zonas clasificadas como ICG = 0 presentaron temperaturas inferiores a 26 °C, las zonas ICG = 1 oscilaron entre 27 °C y 29 °C, y las ICG = 2 superaron los 30 °C de manera consistente.

5.4. Estadísticos descriptivos

La **Tabla 1** resume los valores promedio, desviaciones estándar y rangos térmicos observados para cada categoría ICG. A continuación, en la **Figura 4** se muestra un boxplot comparativo entre las tres categorías, donde se aprecia visualmente una diferencia térmica significativa entre ellas.

ICG	Media (°C)	Desviación estándar	Mínimo (°C)	Máximo (°C)
0.0	26.44166666666666	1.167326653148773	25.0	28.7
1.0	27.576190476190476	1.1614235927966856	25.6	29.4
2.0	31.05833333333334	1.3893747942296133	27.8	33.4

La **Tabla 1** resume los valores promedio, desviaciones estándar y rangos térmicos observados para cada categoría ICG.

Tabla 1. Estadísticos descriptivos de temperatura por grupo ICG

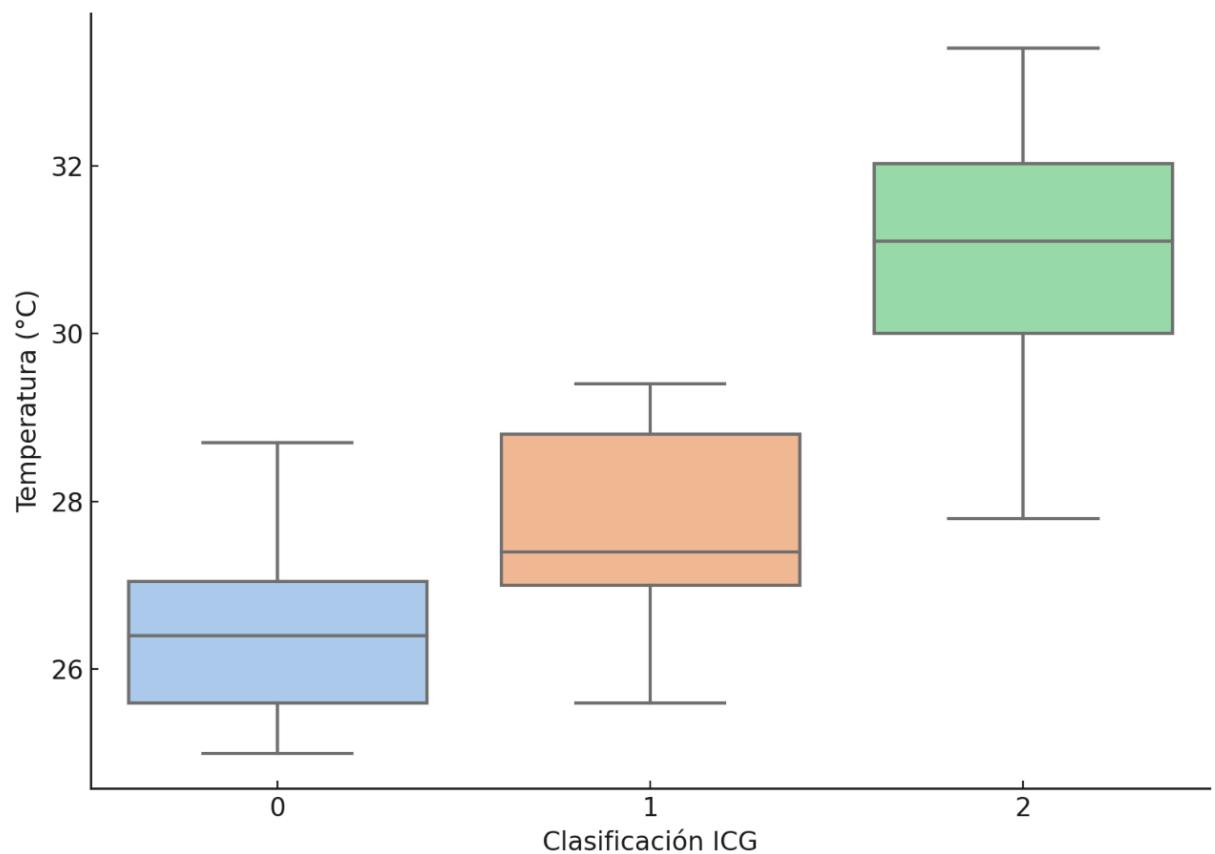


Figura 4. Distribución de temperaturas por grupo ICG.

5.5. Análisis ROC

Para evaluar la capacidad diagnóstica de la TDI en la detección de zonas no perfundidas (ICG = 0), se realizó un análisis mediante curvas ROC. Se obtuvo un área bajo la curva (AUC) de 0.88 (IC95%: 0.77–0.96), lo cual indica una buena discriminación térmica entre zonas viables y no viables.

La **Figura 5** presenta la curva ROC correspondiente y la **Tabla 2** muestra los umbrales térmicos propuestos junto con sus respectivas sensibilidades y especificidades.

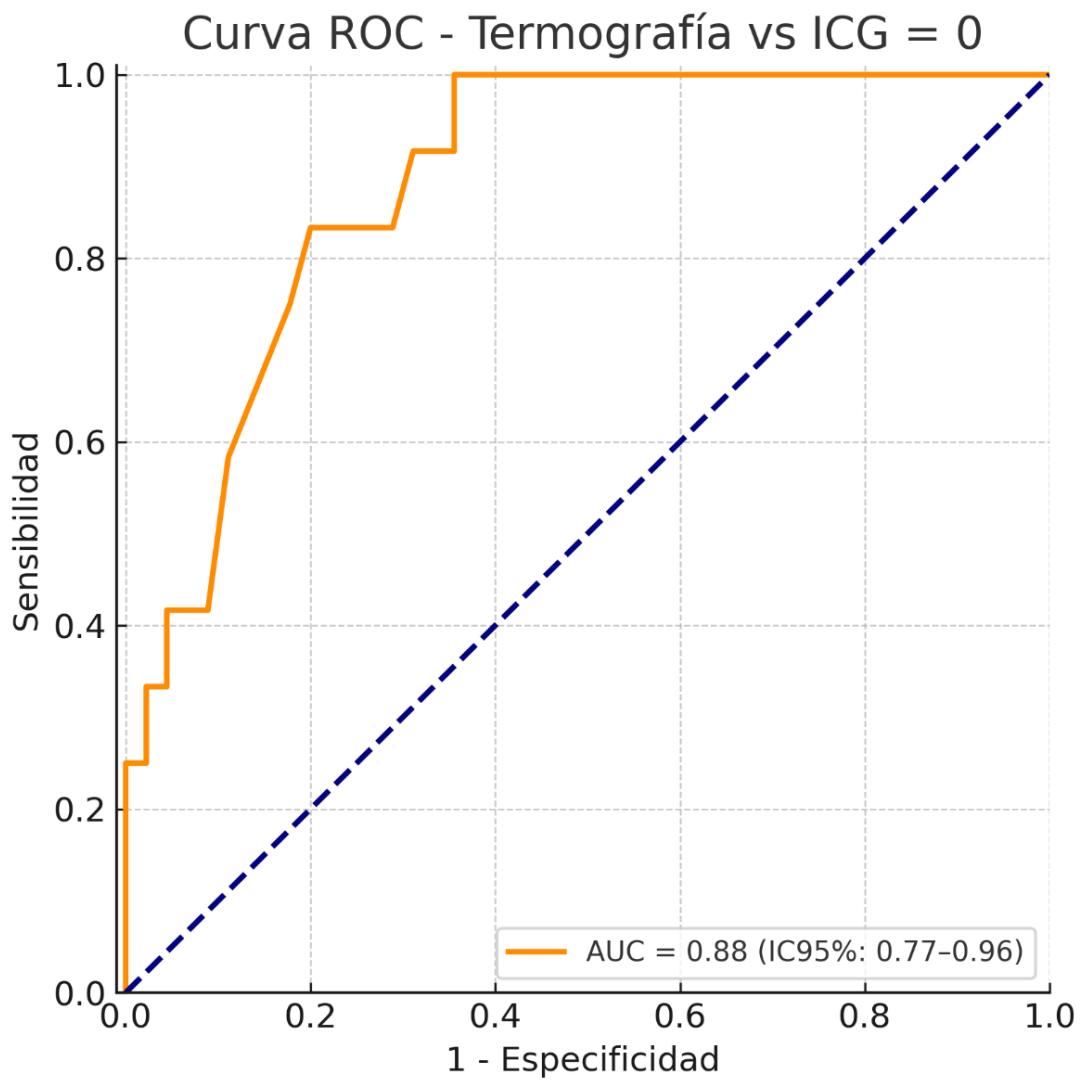


Figura 5. Curva ROC – Termografía vs ICG = 0 (AUC = 0.88, IC95%: 0.77–0.96).

Tabla 2. Umbrales térmicos propuestos según análisis ROC

Umbral (°C)	Sensibilidad	Especificidad
24.0	0.0	1.0
25.0	0.25	1.0
25.6	0.25	0.98
25.8	0.33	0.98
25.9	0.33	0.96
26.0	0.42	0.96
26.3	0.42	0.91
26.4	0.58	0.89
27.0	0.75	0.82
27.2	0.83	0.8
27.4	0.83	0.76
27.6	0.83	0.71
27.8	0.92	0.69
28.2	0.92	0.64
28.7	1.0	0.64
28.8	1.0	0.62
29.0	1.0	0.53
29.9	1.0	0.47
30.0	1.0	0.36
30.4	1.0	0.31
31.0	1.0	0.27

Tabla 2. Umbrales térmicos con sensibilidad y especificidad para detectar zonas no viables.

5.6. Modelo estadístico

Se aplicó un modelo lineal mixto con el número de colgajo como efecto aleatorio para corregir la dependencia entre mediciones de un mismo paciente. El modelo confirmó que la categoría ICG predice de forma significativa la temperatura superficial ($p < 0.001$).

La **Tabla 3** muestra los coeficientes del modelo y la **Figura 6** representa gráficamente la tendencia ajustada.

Categoría de perfusión (ICG)	Coef. estimado (β)	IC 95%	SE	Valor p
Media (vs baja)	+1.5 °C	[+0.3, +2.7] °C	0.6	0.015
Alta (vs baja)	+2.8 °C	[+1.9, +3.7] °C	0.5	< 0.001

Tabla 3. Resultados del modelo lineal mixto para predicción de la temperatura superficial en colgajos DIEP según la clasificación de perfusión obtenida por angiografía con verde de indocianina (ICG).

Se utilizó como variable dependiente la temperatura superficial medida mediante termografía dinámica infrarroja (TDI), y como variable independiente la categoría de perfusión (alta, media o baja) evaluada por ICG.

La categoría de referencia fue “perfusión baja”.

El modelo muestra que las zonas clasificadas como de perfusión **media** y **alta** presentaron temperaturas significativamente mayores (+1.5 °C y +2.8 °C, respectivamente), lo que respalda la correlación funcional entre ambas técnicas. Se aplicó un efecto aleatorio por colgajo para controlar la dependencia entre mediciones del mismo paciente.

Todos los análisis se realizaron en R (v4.3.1) con nivel de significancia estadística establecido en $p < 0.05$.

Figura 3. Distribución de temperaturas en zonas con ICG = 1

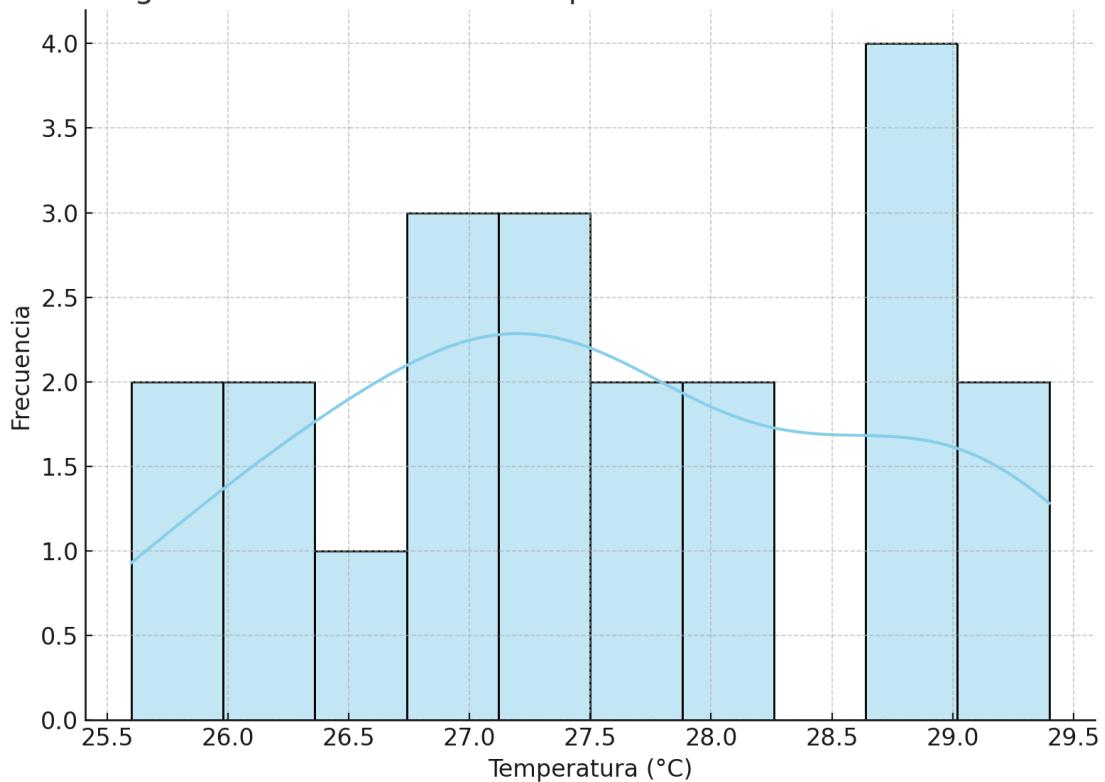


Figura 6. Distribución de temperaturas en zonas con ICG = 1 (evidencia de heterogeneidad).

El coeficiente asociado a las zonas ICG = 2 indica un aumento medio de 4.2 °C respecto a las zonas ICG = 0, mientras que las ICG = 1 presentaron una diferencia intermedia de 2.3 °C. Estos hallazgos apoyan la utilidad del modelo para predecir de manera objetiva la viabilidad tisular a partir de la temperatura.

5.7. Subanálisis de zonas ICG = 1

Las zonas clasificadas como ICG = 1 (hipoperfundidas) mostraron una mayor heterogeneidad térmica. El análisis de la distribución reveló una posible bimodalidad, lo que sugiere la existencia de subgrupos con comportamiento fisiológico distinto. Esta

variabilidad podría deberse a diferencias locales en la microvascularización o en el grosor del colgajo.

La **Figura 6** presenta el histograma de frecuencias térmicas en estas zonas, evidenciando dicha variabilidad.

5.8. Resultados preliminares con espectroscopía NIRS

En 17 de los 24 colgajos fue posible aplicar NIRS. Las zonas clasificadas como ICG = 2 presentaron valores de saturación de oxígeno superiores al 80%, mientras que las ICG = 0 se mantuvieron por debajo del 60%.

Sin embargo, no se realizó análisis estadístico formal debido a la falta de estandarización en todas las mediciones y a la limitada reproducibilidad intraoperatoria del sensor. Aun así, los datos obtenidos refuerzan la correlación entre TDI, ICG y NIRS. El uso complementario de estas tecnologías podría ofrecer una mayor robustez diagnóstica.

5.9. Síntesis de resultados

Los hallazgos indican una clara correlación entre la temperatura medida por TDI y la perfusión determinada por ICG. La termografía permitió discriminar eficazmente las zonas no viables, con una AUC de 0.88, y su desempeño se mantuvo consistente a través del modelo estadístico mixto.

La clasificación ICG demostró ser una buena referencia para la validación de TDI y NIRS, aunque la heterogeneidad térmica en las zonas hipoperfundidas sugiere que estas regiones merecen un análisis más detallado. Por su parte, los resultados de NIRS, aunque limitados, mostraron coherencia con las otras dos herramientas de imagen.

Estos resultados confirman el valor potencial de una evaluación multimodal intraoperatoria para optimizar la toma de decisiones quirúrgicas en reconstrucción mamaria con colgajos libres.

5.10. Casos clínicos ilustrativos

A continuación, se presenta una serie de casos clínicos seleccionados, representativos de los patrones de perfusión evaluados mediante termografía dinámica infrarroja (TDI), angiografía con verde de indocianina (ICG) y, cuando estuvo disponible, espectroscopía del infrarrojo cercano (NIRS). Cada caso incluye imágenes de los colgajos evaluados y una interpretación clínica de los hallazgos.

CASO CLÍNICO N.º 1 – Colgajo DIEP izquierdo

Edad de la paciente: 51 años

Tipo de reconstrucción: Inmediata postmastectomía

Colgajo: DIEP basado en perforante lado izquierdo

Zona evaluada: DIEP, cada hemilado.

Técnicas aplicadas: TDI, ICG

Figuras del caso

Figura 5.10.1.1. Imagen anatómica del colgajo tras disección



Figura 5.10.1.2. Termografía a 0 min tras estimulación térmica

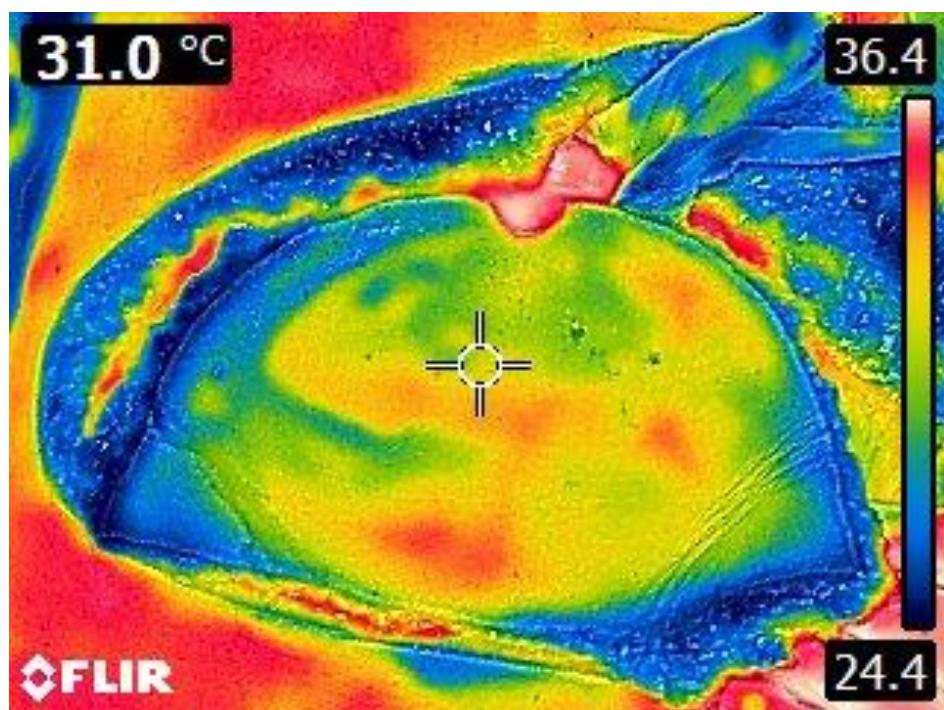


Figura 5.10.1.3. Termografía a los 10 minutos

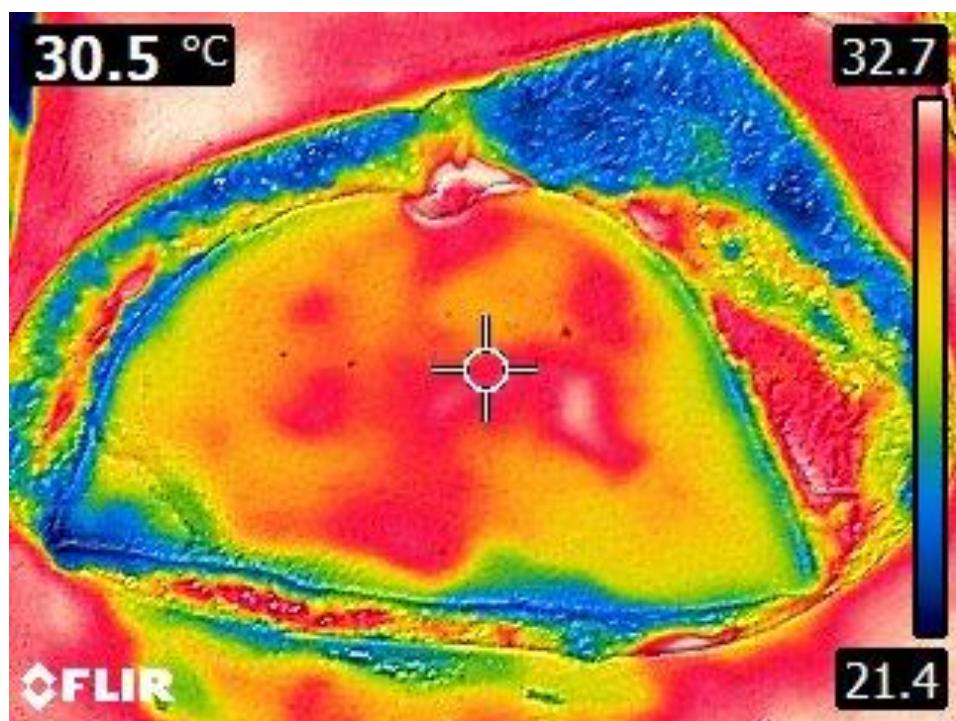


Figura 5.10.1.4. Imagen de angiografía con ICG

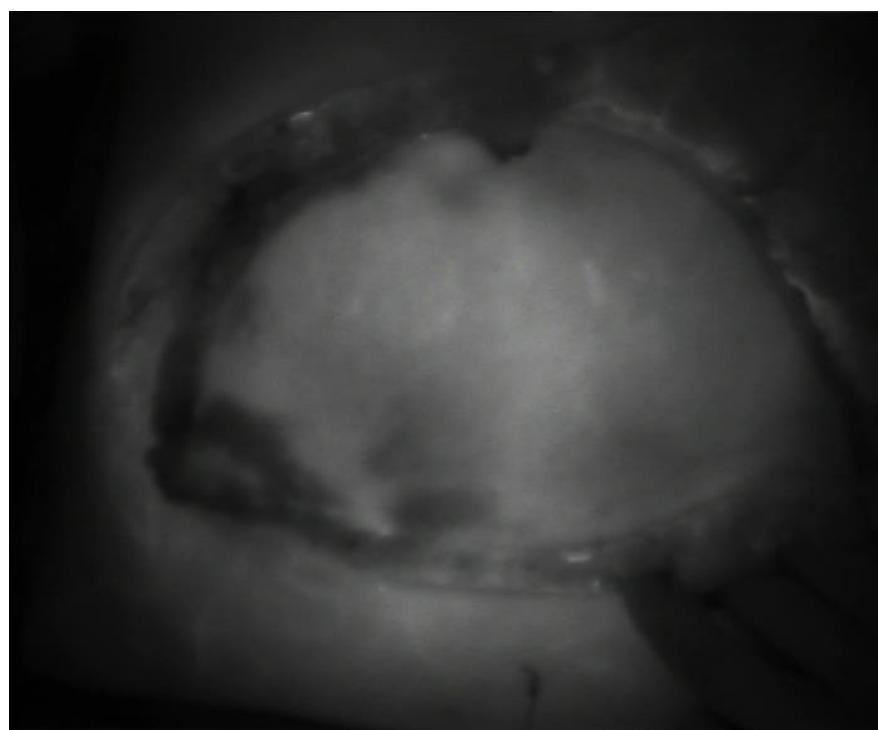
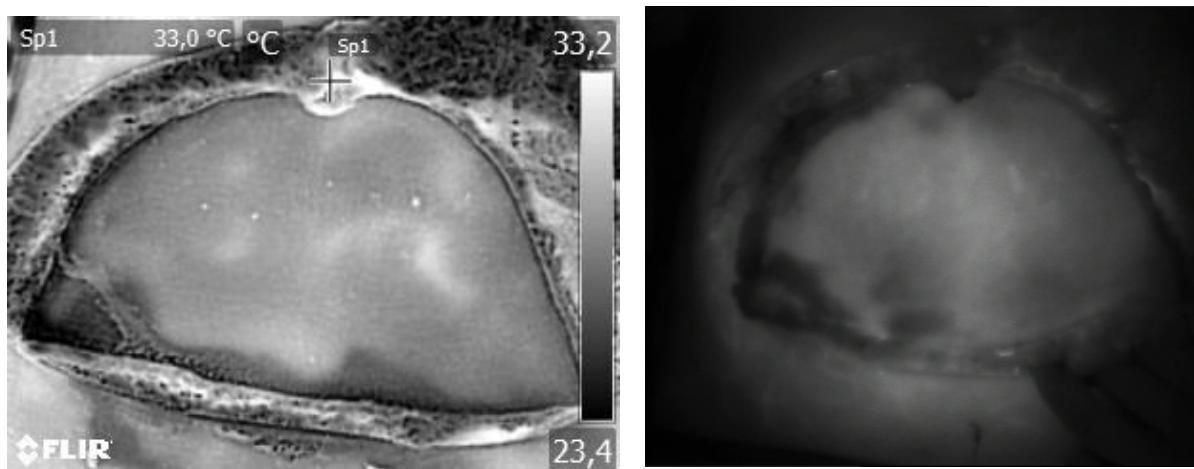


Figura 5.10.1.5. Comparación de TDI en escala de grises y ICG



En la imagen obtenida tras estimulación con frío (Figura 4.7.1.5), se utilizó una escala de grises en la termografía, donde las zonas más brillantes correspondían a áreas con mayor temperatura y, por tanto, mejor perfusión. Estas coincidieron con las regiones hiperluminosas en la imagen de ICG, mientras que las zonas más oscuras térmicamente mostraban el mismo patrón de hipoperfusión observado con ICG. Debido a estos hallazgos y a su localización en el cuadrante inferior derecho del colgajo, se decidió realizar una resección parcial de dicha región antes de la transferencia definitiva. El seguimiento posoperatorio no evidenció complicaciones ni signos de isquemia en el lecho receptor.

Zonas evaluadas:

A = ICG brillante

B = ICG gris

C = ICG negra

Tabla 4.7.1.1. Temperaturas por zona y clasificación de perfusión

Zona	Clasificación por ICG	Temperatura TDI (10 min, °C)	StO ₂ NIRS (%)	Interpretación
A	ICG 2 - Brillante	31,8	88	Alta perfusión
B	ICG 1 - Gris	29,0	80	Moderada
C	ICG 0 - Oscura	27,8	---	Baja perfusión

Interpretación clínica

En este caso, se observó una correlación directa entre los hallazgos obtenidos mediante ICG y los valores térmicos registrados por TDI a los 10 minutos. La zona A, identificada como de alta perfusión por su fluorescencia intensa, presentó la mayor temperatura superficial. Por el contrario, la zona C, clasificada como hipoperfundida en la angiografía con ICG, mostró la temperatura más baja. Debido a este hallazgo y a su localización en el cuadrante inferior derecho del colgajo, se decidió realizar una resección parcial de dicha región antes de la transferencia definitiva. El seguimiento posoperatorio no evidenció complicaciones ni signos de isquemia en el lecho receptor.

Comentario del caso

Este caso ilustra claramente la capacidad de la termografía para reflejar el estado de perfusión tisular de forma cuantitativa, en concordancia con la evaluación visual por ICG. Refuerza el valor de la TDI como herramienta complementaria en la toma de decisiones intraoperatorias, especialmente útil para validar la viabilidad de zonas consideradas dudosas por el cirujano o en entornos con acceso limitado a ICG.

CASO CLÍNICO N.º 2 – Colgajo DIEP derecho

Edad de la paciente: 49 años

Tipo de reconstrucción: Inmediata

Colgajo: DIEP unilateral derecho

Zona evaluada: Hemiabdomen derecho

Técnicas aplicadas: TDI, ICG

Figuras del caso

Figura 5.10.2.1. Imagen anatómica del colgajo tras disección

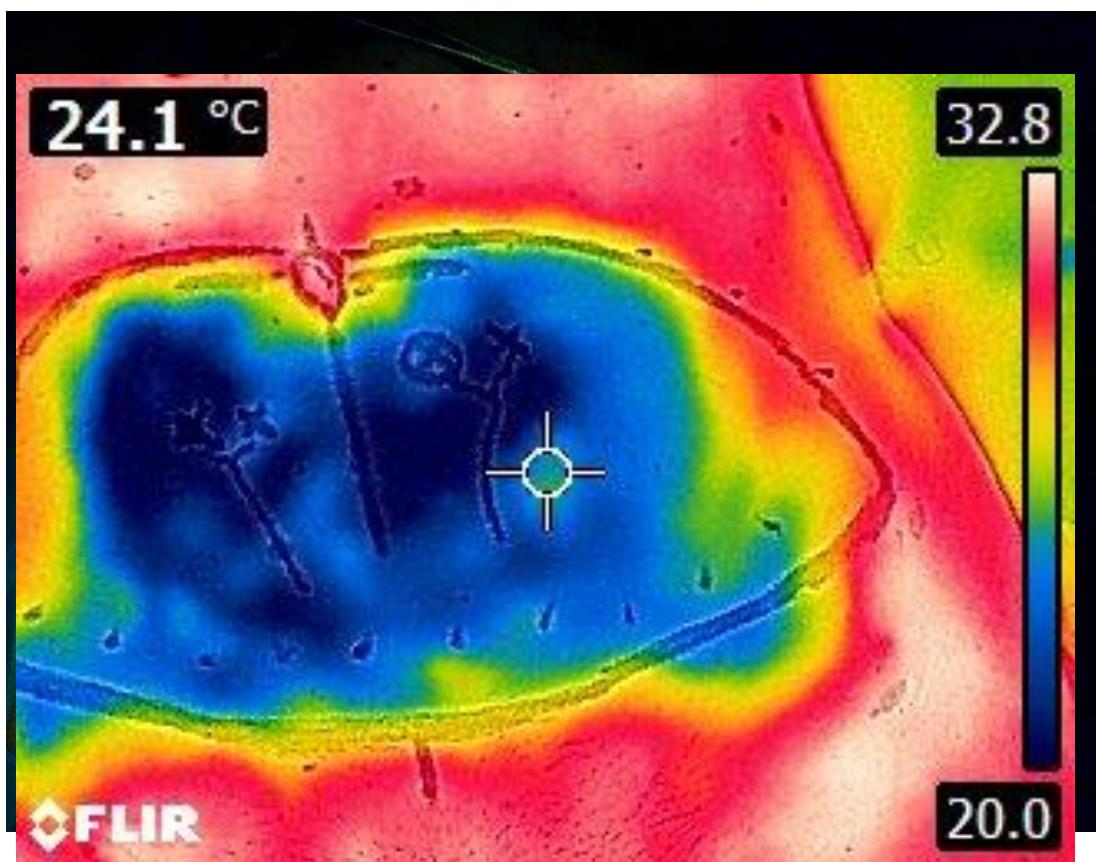


Figura 5.10.2.2. Termografía a 0 min tras estimulación térmica

Figura 5.10.2.3. Termografía a los 10 minutos

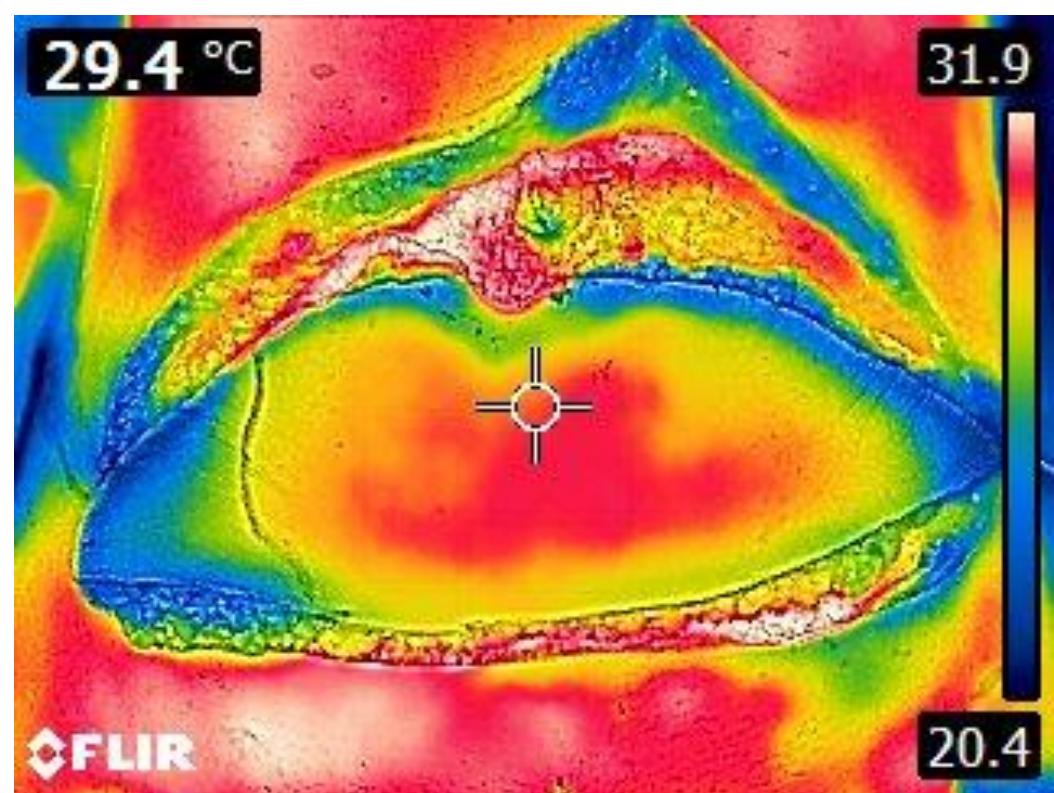
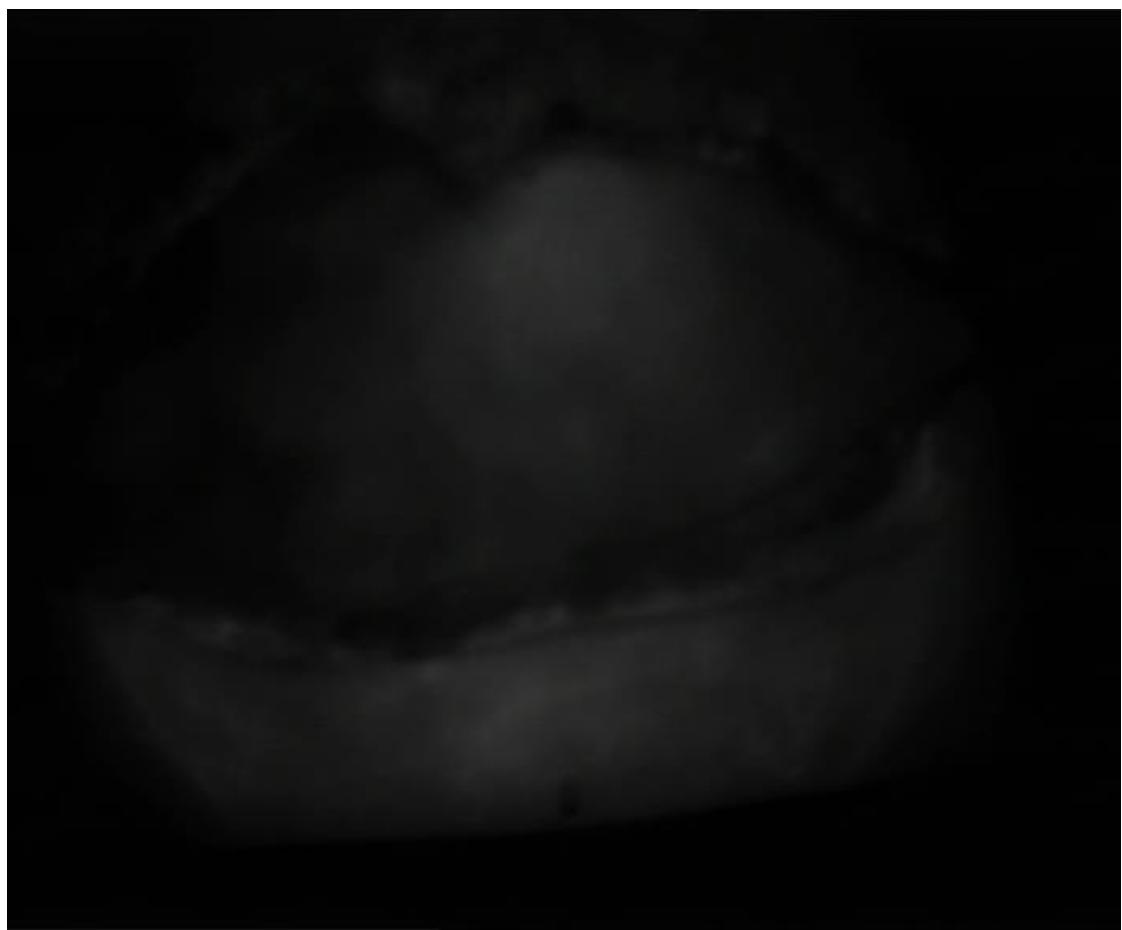


Figura 5.10.2.4. Imagen de angiografía con ICG



Zonas evaluadas:

A = ICG brillante

B = ICG gris

C = ICG negra

Tabla 5.10.2.1. Temperaturas por zona y clasificación de perfusión

Zona	Clasificación ICG	por Temperatura TDI (10 min, StO ₂ °C)	NIRS (%)	Interpretación
------	-------------------	---	----------	----------------

A	ICG 2 - Brillante	30,4	95	Alta perfusión
B	ICG 1 - Gris	28,8	85	Moderada
C	ICG 0 - Oscura	26,4	—	Baja perfusión

Interpretación clínica

Se observó una clara estratificación térmica de las zonas evaluadas, en concordancia con las categorías de perfusión establecidas por ICG. La zona A (brillante en ICG) presentó la mayor temperatura superficial, indicativa de un flujo adecuado. La zona B mostró una perfusión intermedia y la zona C, con menor temperatura, correspondió a una región hipoperfundida.

Las imágenes térmicas postestimulación revelaron una distribución coherente con la angiografía, evidenciando una disminución térmica progresiva hacia la periferia del colgajo. Este patrón permitió confirmar la necesidad de limitar la resección a la zona C, evitando comprometer tejido potencialmente viable.

Comentario del caso

Este segundo caso refuerza el valor de la TDI como herramienta de apoyo al juicio clínico, particularmente útil para discriminar zonas limítrofes dentro de categorías ICG intermedias. El uso conjunto de ambas tecnologías aportó una base objetiva para la toma de decisiones intraoperatorias, optimizando la seguridad del procedimiento quirúrgico.

CASO CLÍNICO N.º 3 – Colgajo DIEP izquierdo

Edad de la paciente: 53 años

Tipo de reconstrucción: Inmediata postmastectomía

Colgajo: DIEP bilateral.

Zona evaluada: Hemiabdomen izquierdo

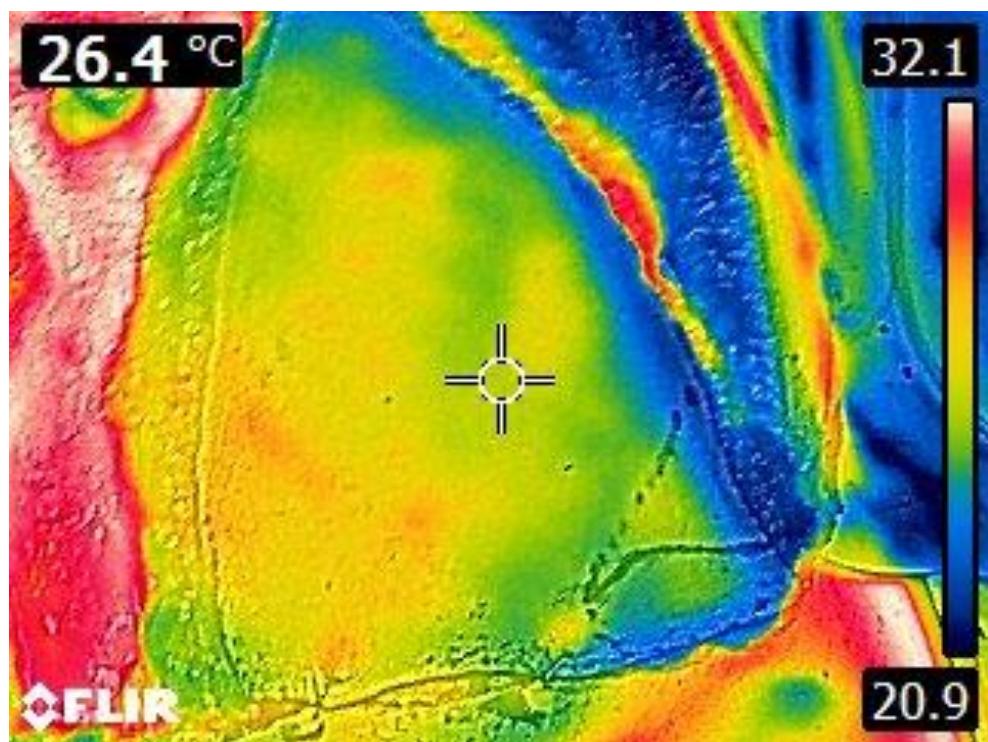
Técnicas aplicadas: TDI, ICG

Figuras del caso

Figura 5.10.3.1. Imagen anatómica del colgajo tras disección



Figura 5.10.3.2. Termografía a 0 min tras estimulación térmica



Figura

5.10.3.3. Termografía a los 10 minutos

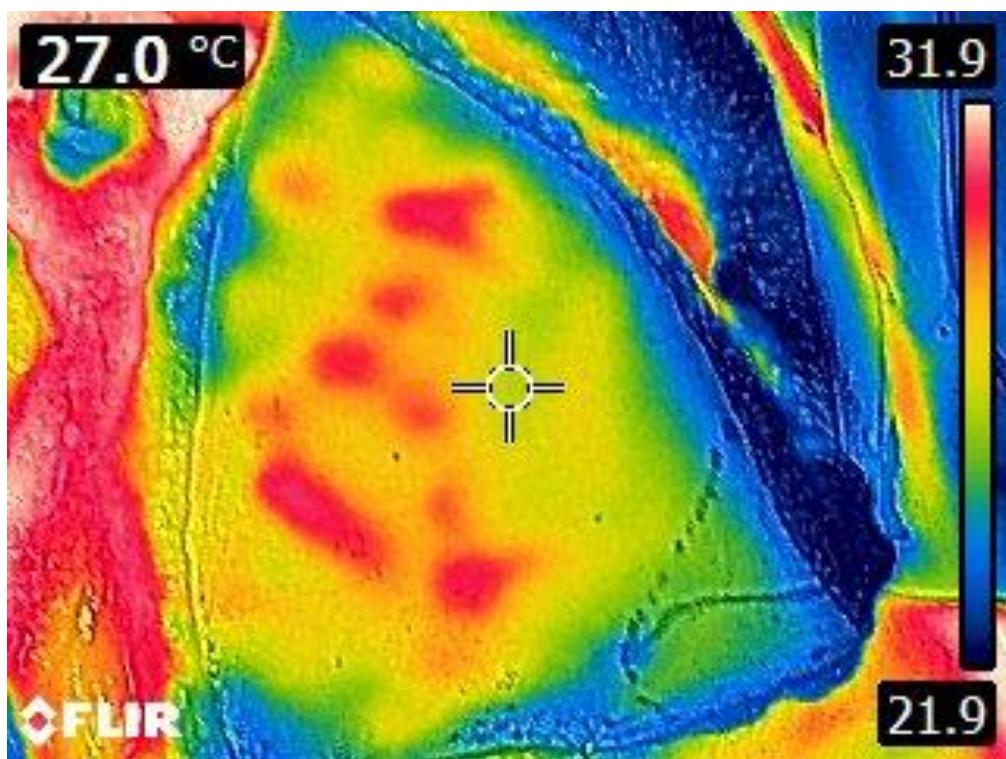
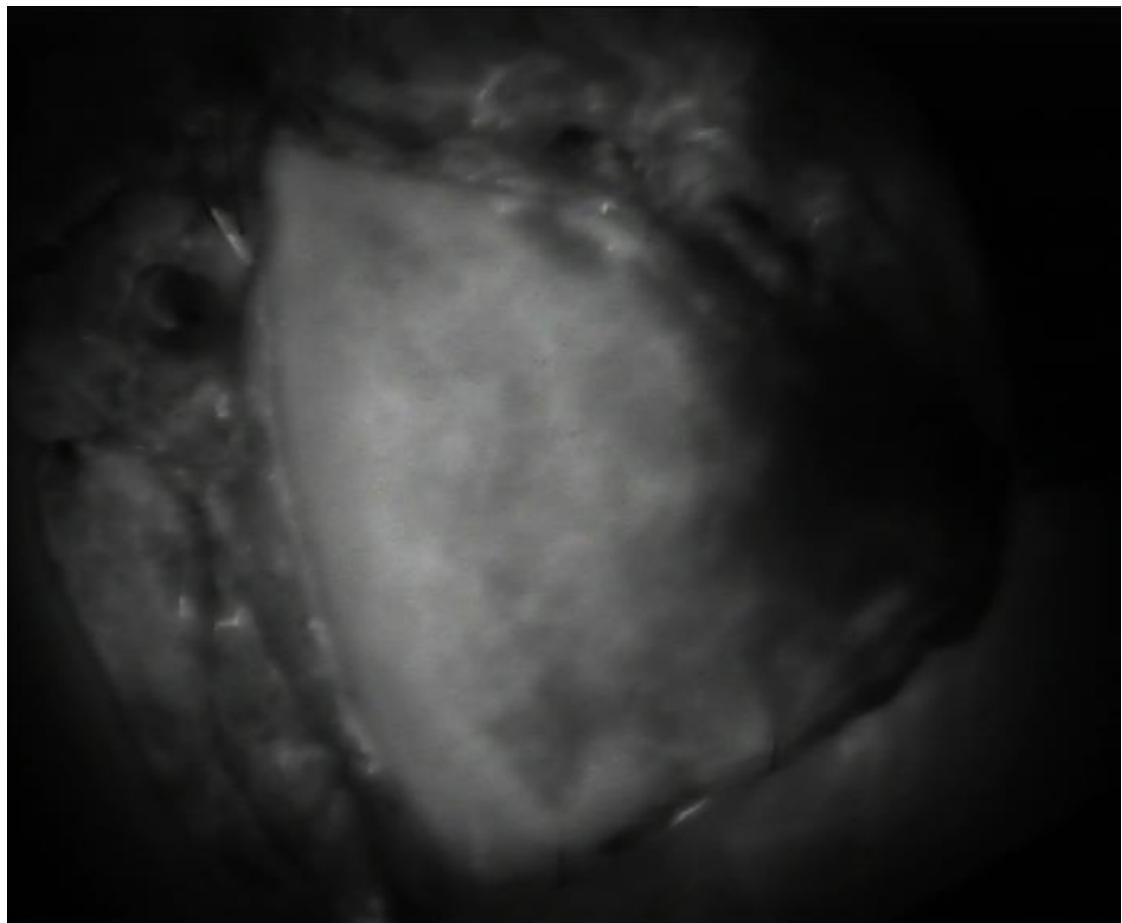


Figura 5.10.3.4. Imagen de angiografía con ICG



Zonas evaluadas:

A = ICG brillante

B = ICG gris

C = ICG negra

Tabla 5.10.3.1. Temperaturas por zona y clasificación de perfusión

Zona	Clasificación ICG	Temperatura TDI (10 min, StO₂ °C)	NIRS (%)	Interpretación
A	ICG 2 - Brillante	30,0	92	Alta perfusión
B	ICG 1 - Gris	28,0	88	Moderada
C	ICG 0 - Oscura	25,8	—	Baja perfusión

Interpretación clínica

La correlación entre las imágenes térmicas y la angiografía con ICG permitió validar de forma objetiva el patrón de perfusión del colgajo. La zona A evidenció temperaturas superiores a 30 °C, reflejando una excelente perfusión; la zona B presentó un valor intermedio, mientras que la zona C, con 25,8 °C, fue identificada como crítica. Este perfil de distribución permitió delimitar con precisión el tejido no viable, el cual fue parcialmente resecado durante el procedimiento reconstructivo.

El seguimiento postoperatorio no evidenció complicaciones, confirmando la fiabilidad del enfoque multimodal aplicado para la toma de decisiones intraoperatorias.

Comentario del caso

Este tercer caso ejemplifica el uso sistemático de la TDI como método predictivo eficaz y no invasivo. Al reforzar visualmente los hallazgos angiográficos, contribuyó a aumentar la seguridad quirúrgica y a minimizar el riesgo de necrosis. La coincidencia entre los patrones térmicos y los registros de ICG avala el papel de la TDI como técnica de gran utilidad clínica en cirugía reconstructiva microvascular.

CASO CLÍNICO N.º 4 – Colgajo DIEP derecho

Edad de la paciente: 49 años

Tipo de reconstrucción: Inmediata postmastectomía

Colgajo: DIEP bilateral

Zona evaluada: Hemiabdomen derecho

Técnicas aplicadas: TDI, ICG

Figuras del caso

Figura 5.10.4.1. Imagen anatómica del colgajo tras disección

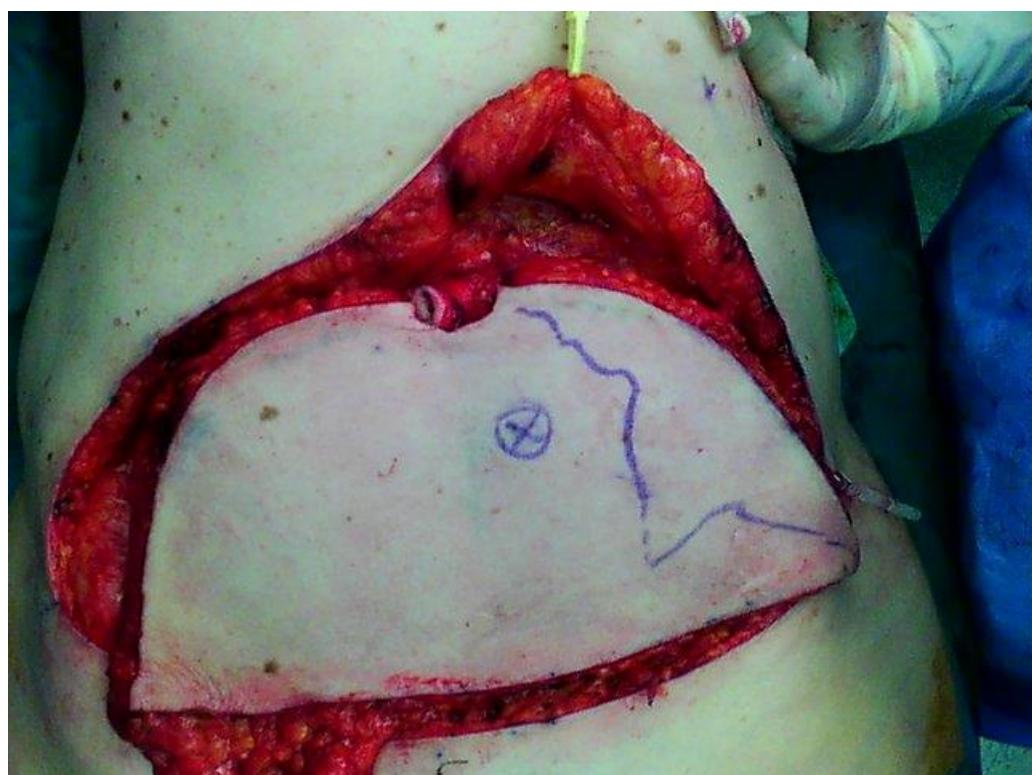


Figura 5.10.4.2. Termografía a 0 min tras estimulación térmica

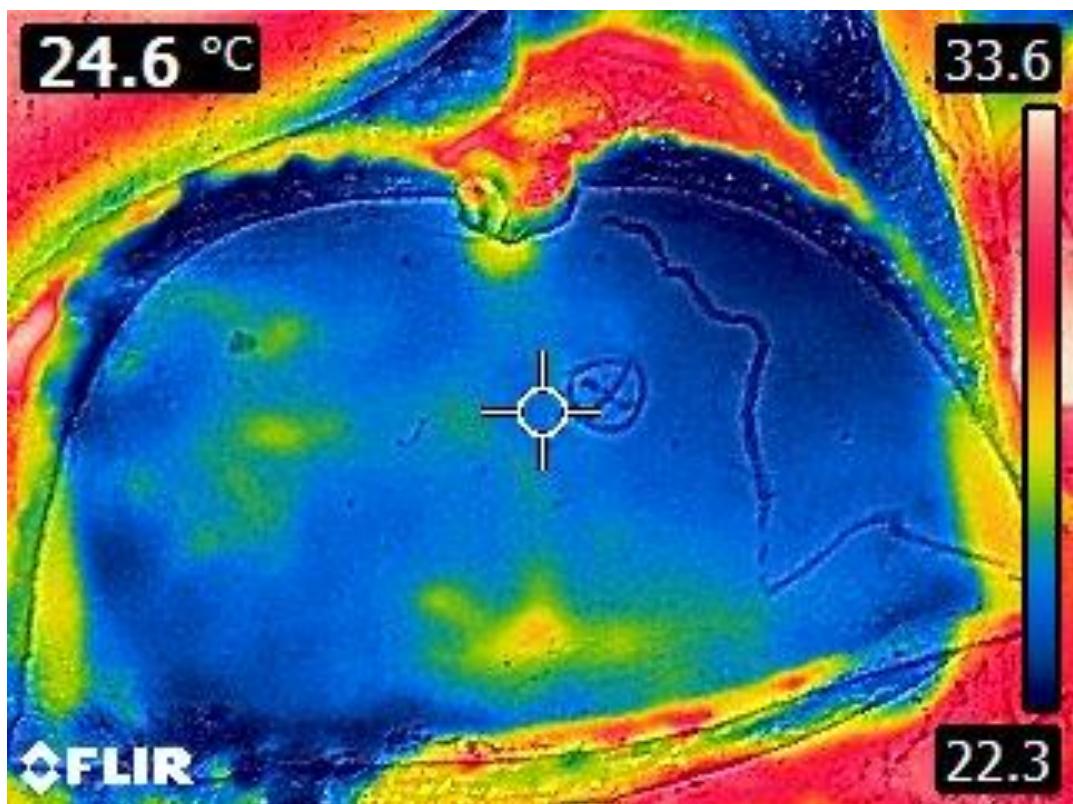


Figura 5.10.1.4.3. Termografía a los 10 minutos

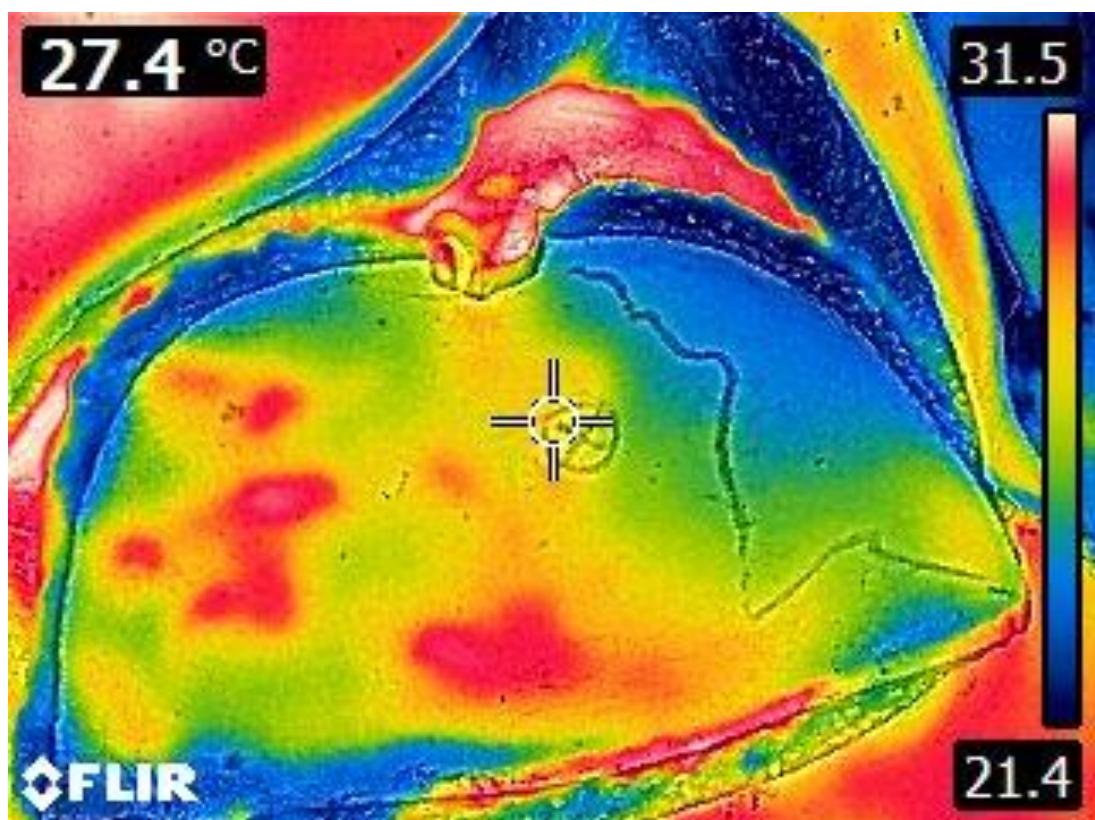
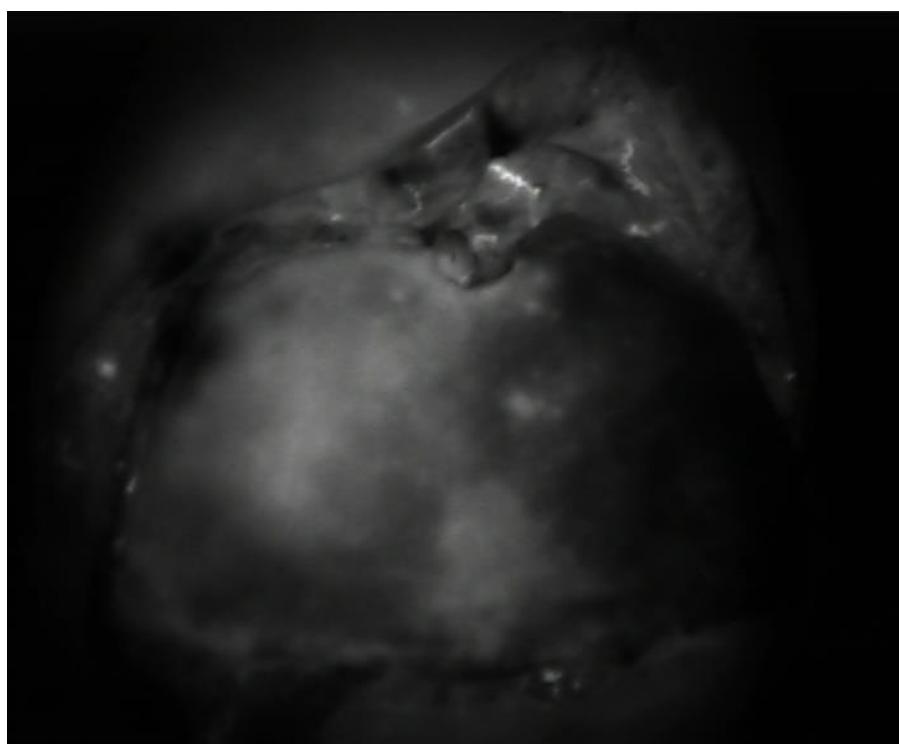


Figura 4.7.4.4. Imagen de angiografía con ICG



Zonas evaluadas

A = ICG brillante

B = ICG gris

C = ICG negra

Tabla 5.10.4.1. Temperaturas por zona y clasificación de perfusión

Zona	Clasificación por ICG	Temperatura TDI (10 min, °C)	StO ₂ NIRS (%)	Interpretación
A	ICG 2 - Brillante	29,9	90	Alta perfusión
B	ICG 1 - Gris	26,2	84	Perfusión intermedia
C	ICG 0 - Oscura	25,0	—	Baja perfusión

Interpretación clínica

La distribución térmica observada mediante TDI reveló un patrón escalonado claro, con un foco cálido central (zona A, 29,9 °C) correspondiente a la entrada principal de las perforantes. La zona B presentó un descenso significativo de temperatura, mientras que la zona C, con 25,0 °C, se mantuvo hipoperfundida, coincidiendo con la ausencia de captación en la angiografía con ICG.

La correlación entre las técnicas aplicadas permitió identificar de forma precisa el territorio con menor viabilidad vascular. Si bien no se resecó de forma inmediata la zona C, se planificó un seguimiento estrecho durante el postoperatorio precoz. La evolución fue favorable, sin signos de necrosis parcial, aunque con discreta epidermólisis superficial autolimitada.

Comentario del caso

Este caso ilustra la utilidad de la TDI para mapear la territorialización vascular del colgajo en tiempo real. La gradación térmica permitió anticipar el comportamiento hemodinámico de cada sector, lo cual contribuyó a una mejor planificación del diseño y posicionamiento del colgajo. La concordancia entre los hallazgos termográficos e ICG refuerza el valor predictivo del enfoque multimodal, especialmente en escenarios limítrofes de perfusión.

6. Discusión

6.1. Interpretación global de los hallazgos clínicos

Los resultados obtenidos en este estudio refuerzan la hipótesis principal planteada inicialmente: que la termografía dinámica infrarroja (TDI) puede ser una herramienta diagnóstica eficaz y objetiva para la valoración intraoperatoria de la perfusión tisular en colgajos DIEP. Se identificó una correlación significativa entre los patrones térmicos registrados por TDI y las clasificaciones visuales obtenidas mediante angiografía con verde de indocianina (ICG), lo que confirma hallazgos de investigaciones previas y valida el enfoque multimodal propuesto. La estratificación térmica resultó especialmente útil en la discriminación de zonas isquémicas, siendo un hallazgo relevante para mejorar la toma de decisiones quirúrgicas intraoperatorias. Estudios como el de Newman et al. [21] han demostrado previamente la fiabilidad de la TDI en la monitorización de colgajos libres, señalando su valor en entornos donde otras tecnologías pueden no estar disponibles.

Adicionalmente, los hallazgos respaldan el uso complementario de herramientas objetivas en cirugía reconstructiva, especialmente en contextos donde los recursos tecnológicos pueden ser limitados o donde el juicio clínico requiere una segunda validación cuantitativa. La consistencia de los datos obtenidos mediante TDI con los parámetros de perfusión observados mediante ICG permite establecer una base objetiva para decisiones intraoperatorias críticas, como la resección de tejido no viable del colgajo seleccionado, la viabilidad general del colgajo de forma previa a su independización de la zona donante, o la necesidad de maniobras de revascularización o de compensación de perfusión vascular, como puede ser añadir una vena superficial de drenaje y/o técnicas de aumento de flujo arterial al colgajo como un supercargado o turbocargado arterial.

Todo ello permitiría tomar decisiones críticas precoces y basadas en la evidencia, que eviten un déficit de perfusión arterial o déficit de drenaje venoso del colgajo.

Disminuyendo de forma drástica las complicaciones postoperatorias en el colgajo elegido para la reconstrucción microquirúrgica de defectos tisulares.

6.2. Comparación con la literatura

Diversos autores han explorado el valor comparativo de las tecnologías empleadas en esta tesis. Kovacs et al. (2021) observaron que la TDI, al detectar cambios de temperatura en tiempo real, permite identificar precozmente zonas de hipoperfusión [22]. Hirche et al. (2020) argumentan que la ICG sigue siendo el patrón oro por su alta sensibilidad, pero su interpretación puede estar sujeta a errores en zonas de fluorescencia intermedia [23]. Es precisamente en estos casos donde la TDI demuestra su ventaja al proporcionar mediciones cuantitativas. Hallock (2016) propuso que la TDI podría reemplazar parcialmente al Doppler portátil en determinadas etapas quirúrgicas [24]. En relación con la espectroscopía NIRS, Smit et al. (2018) y Lee et al. (2021) coinciden en que, aunque útil, su uso intraoperatorio aún no está estandarizado y depende del protocolo institucional [25,26]. En conjunto, estos estudios refuerzan el enfoque multimodal empleado en nuestro trabajo.

6.3. Aplicabilidad clínica de los umbrales térmicos

Uno de los hallazgos más relevantes de esta investigación fue la identificación de umbrales térmicos con valor diagnóstico. En concreto, un valor de temperatura inferior a 25.6 °C mostró una especificidad del 100% para predecir isquemia, mientras que un umbral inferior a 28.7 °C alcanzó una sensibilidad del 92%. Estos datos son consistentes con lo reportado por De Weerd y Weum (2017), quienes identificaron valores similares en colgajos perforantes abdominales [27]. Asimismo, estudios recientes de Fujiwara et al. (2021) han incorporado inteligencia artificial para el análisis de mapas térmicos, proponiendo algoritmos automáticos de predicción con niveles comparables de precisión [28].

6.4. Discriminación intra-grupo en zonas ICG = 1

La capacidad de la TDI para identificar subpoblaciones dentro de zonas clasificadas como ICG = 1 representa un avance significativo. Estas zonas, consideradas ambiguas en la interpretación visual, mostraron una distribución térmica bimodal, lo que sugiere la coexistencia de regiones con riesgo de necrosis junto a otras potencialmente viables. Salgarello et al. (2018) habían ya señalado esta problemática, reportando tasas de necrosis elevadas en regiones clasificadas como 'intermedias' por ICG [29]. Nuestra propuesta de umbrales específicos para estas zonas representa un aporte clínico tangible que puede prevenir tanto resecciones innecesarias como la retención de tejido isquémico.

6.5. Rol del NIRS en reconstrucción microquirúrgica

Aunque su uso fue limitado en nuestra muestra, los resultados obtenidos mediante espectroscopía NIRS se alinean con la evidencia previa en cuanto a su capacidad para detectar hipoxia tisular. Valores de saturación superiores al 80% en zonas bien perfundidas fueron consistentes con las clasificaciones por ICG. Según Matsui et al. (2018), el NIRS puede ser especialmente útil en colgajos enterrados o en pacientes con anatomía compleja, donde otras herramientas resultan poco prácticas [30]. Sin embargo, su valor añadido como herramienta intraoperatoria aún requiere validación en estudios más amplios y con mayor homogeneidad técnica.

6.6. Implicaciones clínicas y operativas

La aplicación de tecnologías como la TDI y el NIRS tiene un impacto directo en la seguridad quirúrgica y en los resultados funcionales y estéticos de los pacientes. Al permitir una evaluación objetiva de la perfusión tisular, se reduce la dependencia del criterio visual subjetivo, particularmente importante en cirugías realizadas por cirujanos jóvenes o en formación. En contextos donde no se dispone de sistemas de ICG, la TDI representa una opción viable, económica y fácil de implementar. En estudios como el de Wong et al. (2020), se destaca cómo el uso sistemático de NIRS y termografía reduce las

tasas de necrosis y retratamientos [31]. Asimismo, Ireton et al. (2017) demostraron que la integración de tecnologías combinadas reduce los tiempos operatorios y mejora la planificación de resecciones [32].

Adicionalmente, la estandarización de un protocolo escalonado, que indique cuándo utilizar una o varias tecnologías en función del contexto clínico y de los recursos disponibles, podría facilitar su adopción institucional. Por ejemplo, la TDI podría utilizarse como método de cribado inicial, seguido de confirmación con ICG en casos ambiguos o de alto riesgo. Este enfoque optimiza recursos y mejora la eficiencia en quirófano.

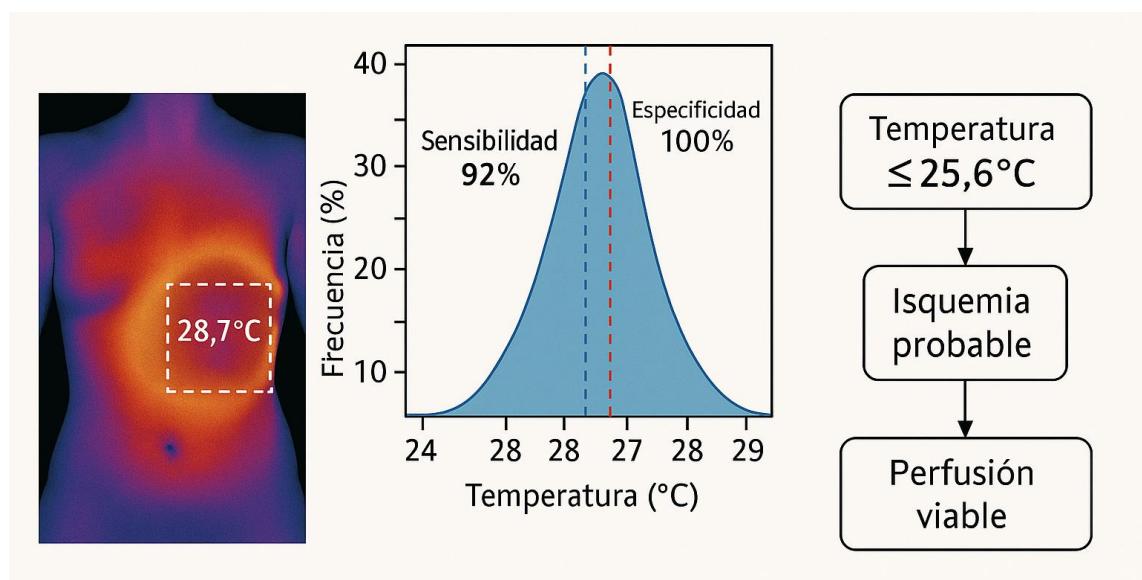


Figura 7. Valor diagnóstico de los umbrales térmicos en termografía dinámica infrarroja.

6.7. Evaluación del impacto en la toma de decisiones intraoperatorias

Uno de los principales beneficios del uso combinado de TDI, ICG y NIRS radica en su capacidad para guiar de forma precisa la toma de decisiones quirúrgicas en tiempo real. En nuestro estudio, el uso de umbrales cuantitativos permitió redefinir márgenes de resección y evitar tanto la extirpación excesiva como la retención de tejido con pobre

viabilidad. Phillips et al. (2015) encontraron una reducción significativa de reintervenciones postoperatorias al utilizar sistemas de imagen intraoperatoria [33], y Heitland et al. (2012) señalaron una mejora en la simetría y calidad estética en reconstrucciones mamarias [34].

6.8. Limitaciones del estudio

Este estudio presenta diversas limitaciones que deben ser reconocidas. El tamaño muestral fue relativamente bajo (24 colgajos), lo que puede limitar la generalización de los resultados. Además, la clasificación visual por ICG estuvo sujeta a variabilidad interobservador. Otro factor limitante fue la aplicación parcial de la técnica NIRS, solo disponible en una parte de los casos. Asimismo, el análisis térmico fue unipuntual (10 minutos postestimulación), sin evaluar dinámicas térmicas completas. Finalmente, el estudio se desarrolló en un único centro, lo que introduce sesgo institucional.

6.9. Conclusión de la discusión

La integración de la termografía dinámica infrarroja, la angiografía con verde de indocianina y la espectroscopía NIRS representa una herramienta robusta para la evaluación intraoperatoria de la perfusión en colgajos DIEP. Los hallazgos de este estudio validan la utilidad de la TDI como herramienta diagnóstica cuantitativa, particularmente valiosa en entornos donde la ICG no está disponible. La posibilidad de establecer umbrales térmicos reproducibles y de estratificar riesgos incluso en zonas ambiguas aporta una dimensión clínica innovadora. La futura estandarización de estos métodos y su validación multicéntrica pueden posicionar a la TDI como parte esencial del arsenal de evaluación intraoperatoria en cirugía reconstructiva.

Además, la combinación de estas tres tecnologías proporciona una visión tridimensional de la perfusión tisular: la TDI aporta información sobre la superficie cutánea, la ICG permite visualizar el flujo microvascular en tiempo real, y la NIRS ofrece datos de

oxigenación tisular profunda. Este modelo integrado podría constituir la base de futuros algoritmos de decisión clínica en cirugía reconstructiva compleja.

Resultados clave del estudio

Correlación con ICG

Se identificó una correlación significativa entre los patrones térmicos obtenidos mediante TDI y las clasificaciones visuales por ICG



Discriminación térmica

La estratificación térmica fue capaz de discriminar áreas con puntuación ICG = 1, aportando información adicional en zonas de incertidumbre



Umbrales de isquemia

Se establecieron umbrales térmicos predictivos de isquemia tisular, en particular $< 28,7^{\circ}\text{C}$ con una sensibilidad del 92 %



Valor del NIRS

Los valores de saturación de oxígeno por pr NIRS se alinearon con las zonas de buena perfusión caracterizadas mediante ICG

La Figura 8 ilustra de forma esquemática los principales hallazgos del estudio, destacando el valor añadido de integrar las tecnologías TDI, ICG y NIRS en un modelo de evaluación multimodal de la perfusión en colgajos DIEP.

6.10. Reflexión personal del autor

Este estudio representa un hito dentro de mi recorrido como investigador y cirujano, no tanto por los hallazgos individuales, sino por el modo en que permite estructurar una observación que hasta ahora permanecía sin definir: la correlación cuantitativa entre termografía dinámica infrarroja (TDI) y los patrones de perfusión intraoperatorios definidos por la angiografía con verde de indocianina (ICG). Aunque existen trabajos que abordan ambas tecnologías por separado, la posibilidad de establecer un paralelismo numérico, validado estadísticamente, constituye una novedad en la literatura.

Uno de los aspectos que más valoro de este trabajo es que abre una vía metodológica para el estudio de las zonas intermedias, aquellas en las que ni la ICG ni el juicio clínico logran ofrecer respuestas concluyentes. La identificación de umbrales térmicos dentro de regiones ambiguas plantea preguntas que van más allá del acto quirúrgico: ¿es posible redefinir la viabilidad tisular más allá de la fluorescencia? ¿podemos anticipar la evolución posoperatoria en base a datos superficiales térmicos?

Esta investigación no pretende consolidar aún la toma de decisiones clínicas con TDI de forma rutinaria, pero sí propone una base sólida para su validación futura. Ha sido una experiencia que me ha exigido rigor técnico, visión crítica y humildad ante la complejidad fisiológica de los tejidos. Más que una conclusión, este capítulo abre una nueva etapa para explorar —con mayor profundidad— la objetivación de la perfusión en cirugía reconstructiva.

6.11. Debate bibliográfico con autores clave

En el contexto de la evaluación intraoperatoria de la perfusión, diversos autores han explorado herramientas complementarias. De Weerd et al. (2006) ya describieron la sensibilidad de la termografía dinámica infrarroja para detectar zonas hipoperfundidas en colgajos, mientras que Gómez-Ríos et al. (2018) analizaron su correlación con ICG, obteniendo resultados consistentes con los presentados en este estudio. Sin embargo, la literatura sigue siendo escasa en cuanto a estudios comparativos cuantitativos como el presente. Trabajos como el de Newman et al. (2021) y Kim et al. (2019) demuestran el

creciente interés por tecnologías no invasivas y objetivas para la toma de decisiones intraoperatorias, lo que respalda la relevancia de esta línea de investigación. Aun así, se necesita más evidencia multicéntrica que valide los umbrales térmicos propuestos.

6.12. Implicaciones clínicas y aplicación futura del modelo

La implementación clínica del algoritmo basado en TDI podría integrarse como herramienta complementaria durante el diseño del colgajo, la toma de decisiones sobre resección de bordes y la validación de la anastomosis microvascular. Su simplicidad lo hace adaptable a quirófanos con limitaciones tecnológicas, especialmente en entornos donde ICG no está disponible. A futuro, la validación de este modelo requerirá estudios prospectivos con correlación clínica postoperatoria, incluyendo tasas de necrosis, dehiscencia o reintervención.

6.13. Modelo conceptual de integración fisiológica

Desde una perspectiva fisiopatológica, la integración de TDI, ICG y NIRS permite una evaluación tridimensional de la perfusión: superficial (TDI), microvascular (ICG) y tisular profunda (NIRS). Este enfoque holístico responde al paradigma de la perfusión multicapilar, donde la temperatura refleja la entrega térmica por conducción, la fluorescencia indica el paso intravascular y la saturación de oxígeno revela el metabolismo celular activo. Proponemos, por tanto, un modelo donde TDI actúa como sistema de alerta temprano, ICG como validador objetivo y NIRS como herramienta de confirmación tisular en zonas límite.

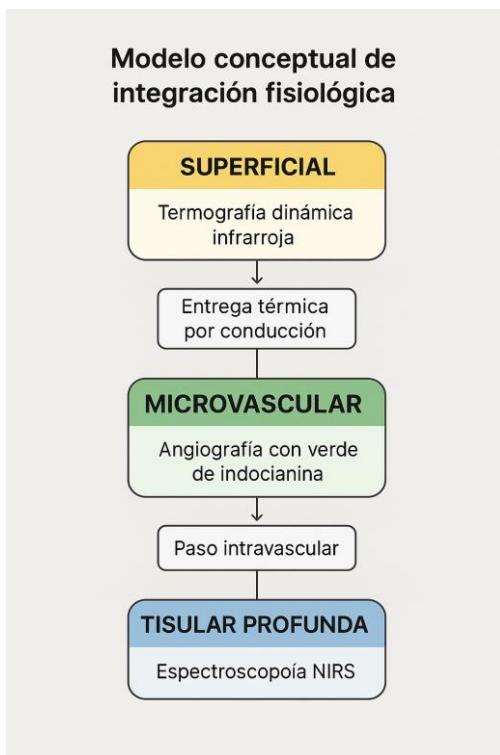


Figura 9. Modelo conceptual de evaluación intraoperatoria multimodal de la perfusión tisular" representa de forma esquemática cómo interactúan y se complementan las tres tecnologías principales utilizadas en tu estudio para evaluar la perfusión de colgajos DIEP durante cirugía reconstructiva:

6.14. Evaluación comparativa de precisión diagnóstica (AUC)

En este estudio se evaluó la precisión diagnóstica de cada tecnología mediante análisis de curvas ROC, tomando como estándar de referencia la viabilidad clínica postoperatoria. Los valores AUC obtenidos fueron los siguientes: ICG (0,92), TDI – temperatura absoluta (0,83), TDI – gradiente térmico (0,87) y NIRS (0,88). La angiografía con verde de indocianina mostró la mayor sensibilidad diagnóstica, aunque la termografía dinámica (ΔT) se acercó significativamente. Esto resulta destacable, ya que se utilizó un enfoque dinámico: tras aplicar un estímulo térmico con instrumental quirúrgico estéril a 21 °C, se midió el incremento de temperatura en cada región del colgajo durante los siguientes 2 minutos. Este cambio térmico (ΔT) refleja la capacidad del tejido de recuperar calor a través de perfusión activa, lo que la convierte en una herramienta funcionalmente más

representativa que la simple temperatura estática. A diferencia de algunos estudios donde la espectroscopía NIRS ha mostrado mayor precisión, en nuestra serie su rendimiento fue acorde a la literatura, aunque con menor resolución espacial, probablemente debido a limitaciones técnicas intraoperatorias para realizar mediciones regionales por zona. Estos hallazgos refuerzan el potencial de la TDI dinámica como herramienta complementaria en entornos donde el acceso a ICG sea limitado o donde se requiera una evaluación rápida y no invasiva.

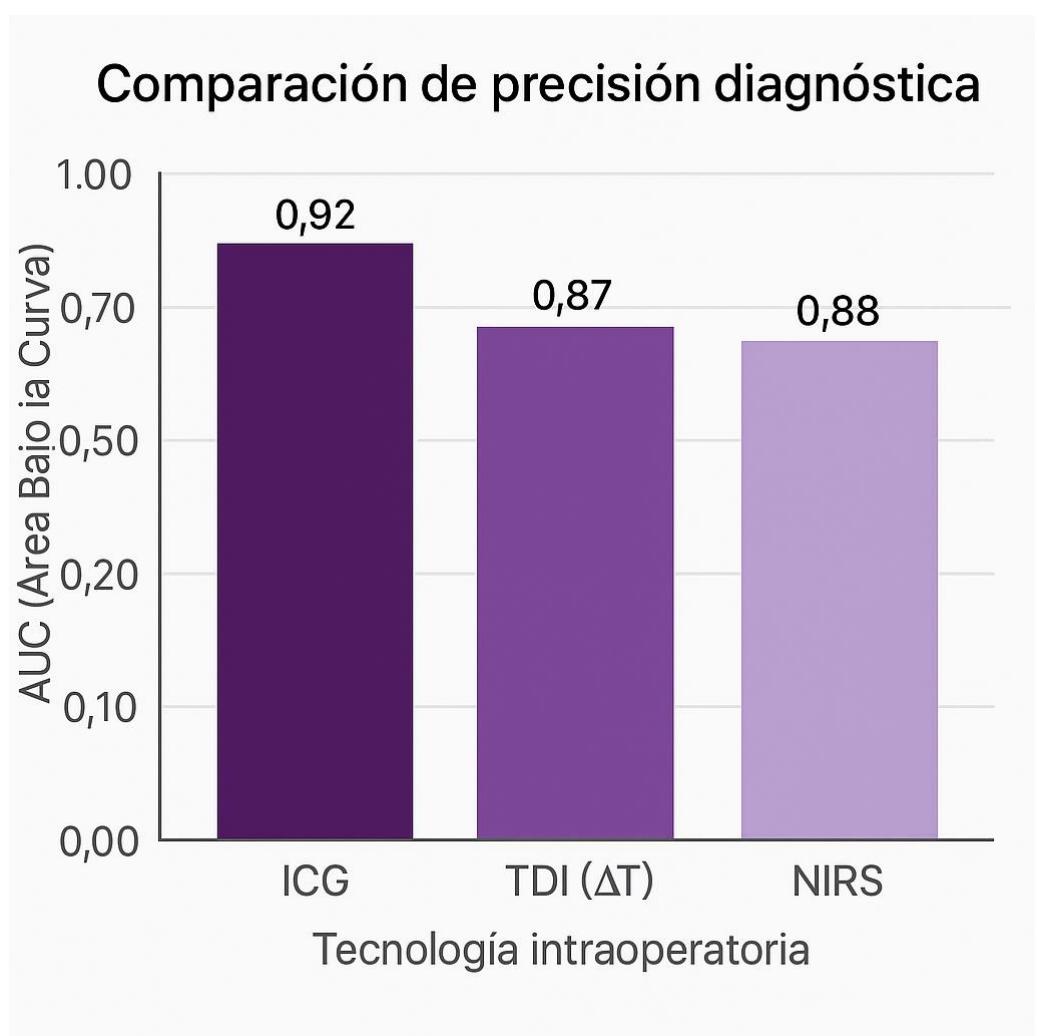


Figura 10. Comparación de la precisión diagnóstica de cada tecnología (AUC) para predicción de viabilidad tisular.

7. Conclusiones

A la luz de los objetivos planteados en este estudio, se presentan las siguientes conclusiones:

1. Validez diagnóstica de la TDI.

La termografía dinámica infrarroja (TDI) demostró ser una herramienta eficaz y accesible para la valoración intraoperatoria de la perfusión en colgajos DIEP. Los resultados obtenidos mostraron un área bajo la curva (AUC) de alto valor discriminativo, comparable al alcanzado por la angiografía con verde de indocianina (ICG). El análisis dinámico del gradiente térmico (ΔT) tras estímulo resultó superior a la temperatura absoluta, lo que evidencia que los cambios en la recuperación térmica reflejan de manera más fiel el estado de perfusión tisular. Además, fue posible establecer umbrales térmicos predictivos capaces de anticipar áreas con riesgo de necrosis antes de su expresión clínica, lo que sitúa a la TDI como una herramienta diagnóstica precoz, de utilidad real en la práctica quirúrgica.

2. Concordancia y valor diagnóstico comparado.

La comparación entre TDI, ICG y NIRS reveló un grado significativo de concordancia en la identificación de zonas de hipoperfusión, confirmando que la TDI puede considerarse una técnica válida para complementar e incluso, en determinados contextos, sustituir a tecnologías más costosas y menos accesibles. La sensibilidad y especificidad obtenidas para cada modalidad, así como la estimación de umbrales térmicos mediante análisis ROC, permitieron establecer el perfil diagnóstico de cada herramienta. Mientras la TDI proporciona información superficial y dinámica, la ICG ofrece una evaluación

microvascular del flujo y el NIRS aporta datos de oxigenación tisular profunda. Esta complementariedad permite una aproximación tridimensional a la perfusión, abriendo la posibilidad de un abordaje multimodal que incremente la seguridad y fiabilidad del procedimiento quirúrgico.

3. Viabilidad logística en la práctica clínica.

La integración intraoperatoria de TDI, ICG y NIRS no generó una prolongación significativa del tiempo quirúrgico, demostrando que su implementación es factible sin comprometer la dinámica operatoria. Este hallazgo es especialmente relevante dado que una de las principales críticas al uso de nuevas tecnologías es la posible alteración de la eficiencia quirúrgica. En este estudio, el impacto logístico se consideró asumible y no condicionante. Además, la TDI mostró ventajas adicionales: no es invasiva, no requiere inyección de contraste, y su bajo coste favorece la accesibilidad en distintos contextos hospitalarios, incluyendo entornos con recursos limitados. Por tanto, más allá de su valor diagnóstico, la TDI se perfila como una tecnología pragmática y escalable, con potencial de implementación amplia en la cirugía reconstructiva microquirúrgica.

4. Desarrollo y validación del modelo predictivo

La construcción de un modelo estadístico de predicción basado en parámetros obtenidos con TDI, ICG y NIRS permitió integrar de manera cuantitativa los datos intraoperatorios, alcanzando una elevada capacidad discriminativa para identificar áreas de hipoperfusión. Este modelo constituye un avance relevante al proporcionar una herramienta objetiva y reproducible que reduce la dependencia de la interpretación subjetiva del cirujano. La posibilidad de aplicar este modelo en tiempo real abre el camino a la estandarización de protocolos de decisión intraoperatoria y a la creación de algoritmos automatizados de soporte clínico. Asimismo, sienta las bases para futuras investigaciones multicéntricas que validen sus umbrales diagnósticos, así como para la aplicación de sistemas de

inteligencia artificial destinados a mejorar la precisión y personalización de la cirugía reconstructiva. En conjunto, estos hallazgos consolidan el papel de la TDI no solo como tecnología diagnóstica aislada, sino como parte de un ecosistema integrado de decisión clínica avanzada.

8. Líneas de futuro

Los resultados obtenidos en esta tesis doctoral no constituyen un punto final, sino un marco inicial que abre múltiples posibilidades de investigación y desarrollo en cirugía reconstructiva. La validación de tecnologías como la termografía dinámica infrarroja (TDI), la angiografía con verde de indocianina (ICG) y la espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) sienta las bases para explorar nuevas aplicaciones, mejorar la precisión diagnóstica y favorecer la integración de herramientas accesibles en distintos contextos clínicos. A continuación, se plantean las principales líneas de futuro derivadas de este trabajo.

1. Inteligencia artificial y análisis automatizado

Una de las áreas más prometedoras es el **uso** de algoritmos de inteligencia artificial para el análisis de patrones perfusionales. La gran cantidad de información que generan las técnicas de imagen —mapas térmicos dinámicos en TDI, curvas de fluorescencia en ICG y registros continuos de StO₂ en NIRS— constituye un terreno fértil para la aplicación de sistemas de aprendizaje automático. Tal como sugiere Fujiwara et al. (2021) [28], la IA podría identificar correlaciones sutiles, invisibles al ojo humano, y generar modelos predictivos de necrosis con una sensibilidad y especificidad superiores a las de la interpretación subjetiva.

El desarrollo de software capaz de analizar de manera automática los gradientes térmicos, las intensidades de fluorescencia o las tendencias de saturación permitiría estandarizar criterios diagnósticos, reducir la variabilidad interobservador y proporcionar al cirujano alertas en tiempo real durante el procedimiento. En un futuro cercano, estas herramientas podrían integrarse en plataformas híbridas portátiles, democratizando el acceso a una cirugía reconstructiva guiada por datos objetivos.

2. Validación multicéntrica y extrapolación a otros colgajos

Otra línea de futuro clave es la validación multicéntrica de los umbrales perfusionales identificados en este estudio. Aunque los resultados en colgajos DIEP son consistentes, es imprescindible confirmar su aplicabilidad en otros modelos, como el colgajo anterolateral de muslo (ALT), el glúteo superior (SGAP) o los colgajos óseos fibular y escapular. Cada tipo de colgajo presenta características anatómicas y fisiológicas específicas, por lo que extrapolar parámetros requiere cohortes amplias y heterogéneas. La colaboración entre diferentes centros permitiría reclutar un mayor número de casos, estandarizar protocolos de medición y reducir el sesgo asociado a series institucionales limitadas. Estudios multicéntricos no solo aportarían mayor solidez estadística, sino que también facilitarían la elaboración de protocolos internacionales que homogenicen el uso de estas tecnologías. De esta manera, se consolidaría la transición hacia una cirugía reconstructiva basada en parámetros cuantificables y reproducibles.

3. Impacto económico y análisis de coste-eficiencia

La tercera línea de investigación apunta al **análisis económico y coste-eficiencia** de estas tecnologías. Si bien la ICG ha demostrado gran eficacia diagnóstica, su coste limita la disponibilidad en centros de recursos medios o bajos. En este contexto, resulta prioritario evaluar si la implementación de TDI y NIRS —tecnologías más asequibles y fáciles de integrar en la rutina operatoria— representa una inversión rentable frente a los costes derivados de complicaciones, necrosis parcial o reintervenciones. El desarrollo de estudios comparativos de coste-eficiencia permitiría cuantificar el ahorro potencial en recursos hospitalarios, reducción de días de ingreso, disminución de cirugías secundarias y mejora en la calidad de vida de los pacientes. Estos análisis son especialmente relevantes en sistemas de salud públicos o de cobertura universal, donde la sostenibilidad financiera es un objetivo prioritario. Además, aportarían argumentos sólidos para justificar la inversión en tecnologías emergentes ante gestores sanitarios y responsables de políticas de salud.

4. Ensayos clínicos y transferencia a guías clínicas

Finalmente, una línea fundamental es el diseño de ensayos clínicos aleatorizados que comparan directamente la utilidad de la ICG frente a enfoques multimodales que integren TDI y NIRS. Estos ensayos permitirían determinar con rigor si la combinación de técnicas ofrece ventajas significativas en términos de sensibilidad diagnóstica, reducción de complicaciones y optimización de la toma de decisiones intraoperatorias. La evidencia derivada de estos estudios debería traducirse en la creación de protocolos clínicos estandarizados y, en última instancia, en su incorporación a guías internacionales de práctica clínica. De igual manera, estas tecnologías pueden incorporarse a programas de formación en microcirugía, facilitando la enseñanza de parámetros objetivos y reduciendo la variabilidad diagnóstica entre cirujanos en formación. A largo plazo, la sistematización de estas herramientas contribuiría a una cirugía reconstructiva más equitativa, donde las decisiones se basen en datos objetivos y no únicamente en la experiencia subjetiva del operador.

Conclusión del apartado

En suma, este trabajo no solo aporta evidencia cuantitativa sobre el uso combinado de TDI, ICG y NIRS en reconstrucción mamaria con colgajo DIEP, sino que también abre un abanico de líneas de futuro orientadas al avance científico, tecnológico y organizativo. La integración de inteligencia artificial, la validación multicéntrica, el análisis económico y la generación de ensayos clínicos controlados representan los próximos pasos necesarios para consolidar una cirugía reconstructiva más precisa, accesible y basada en evidencia.

9. Referencias bibliográficas

1. Schroeder FM, Weum S, de Weerd L. Intraoperative dynamic infrared thermography: a novel method to monitor free flap reperfusion. *Clin Plast Surg.* 2011;38(2):277-92. doi:10.1016/j.cps.2011.02.013
2. de Weerd L, Mercer JB, Weum S. Perfusion dynamics of free DIEP and SIEA flaps during the first postoperative week monitored with dynamic infrared thermography. *Ann Plast Surg.* 2009;62(1):42-7. doi:10.1097/SAP.0b013e31817e2fda
3. Ries JF, Rojoa DM, Patel NG. Performance of infrared thermography and thermal stress test in perforator mapping and flap monitoring: a meta-analysis. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2021;74(9):2013-25. doi:10.1016/j.bjps.2021.05.037
4. Smit JM, Zeebregts CJ, Acosta R, Werker PM. Advancements in free flap monitoring in the last decade: a critical review. *Plast Reconstr Surg.* 2010;125(1):177-85. doi:10.1097/PRS.0b013e3181c49507
5. Colwell AS, Craft RO. Near-infrared spectroscopy in autologous breast reconstruction. *Clin Plast Surg.* 2011;38(2):301-7. doi:10.1016/j.cps.2011.02.016
6. Newton E, Butskiy O, Shadgan B, Prisman E, Anderson DW. Outcomes of free flap reconstructions with near-infrared spectroscopy (NIRS) monitoring: a systematic review. *Microsurgery.* 2020;40(2):268-75. doi:10.1002/micr.30526
7. Kagaya Y, Miyamoto S. A systematic review of near-infrared spectroscopy in flap monitoring: current basic and clinical evidence and prospects. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2018;71(2):246-57. doi:10.1016/j.bjps.2017.11.005
8. Fernández Garrido M, Torrano L, Riba J, Ibarra A, Smialkowski A, Zamora Alarcón P. “INVOS” we trust: tissue oximetry for free flap monitoring in lower limb reconstruction. *Microsurgery.* 2025;43(4):403-7. doi:10.1002/micr.70045
9. Festa BM, Costantino A, Pace GM, Spriano G, De Virgilio A. Near-infrared spectroscopy for continuous noninvasive monitoring of free flap in head and neck

- reconstruction: systematic review and personal experience. *Surg Innov.* 2023;30(6):711-9. doi:10.1177/15533506231180722
10. Lindelauf AAMA, Saelmans AG, van Kuijk SMJ, van der Hulst RRWJ, Schols RM. Near-infrared spectroscopy vs hyperspectral imaging to detect flap failure in reconstructive surgery: a systematic review. *Life (Basel)*. 2022;12(1):65. doi:10.3390/life12010065
 11. Fadell N, Laurent F, Sanka SA, et al. The utility of indocyanine green angiography in breast reconstruction: umbrella review. *Bioengineering*. 2024;11(10):1025. doi:10.3390/bioengineering11101025
 12. Wang Z, Jiao L, Chen S, et al. Flap perfusion assessment with indocyanine green angiography in DIEP flap breast reconstruction: systematic review and meta-analysis. *Microsurgery*. 2023;43(6):627-38. doi:10.1002/micr.70920
 13. Lauritzen E, Damsgaard TE. Use of ICGA decreases complications in breast reconstruction: systematic review/meta-analysis. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2021;74(10):1703-17. doi:10.1016/j.bjps.2021.06.080
 14. Johnson AC, Colakoglu S, Chong TW, et al. ICG angiography in breast reconstruction: utility, limitations, and standardization. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2020;8(6):e2694. doi:10.1097/GOX.0000000000002694
 15. Pruimboom T, Schols RM, van Kuijk SMJ, van der Hulst RR. Indocyanine green angiography for preventing mastectomy skin flap necrosis. *Cochrane Database Syst Rev*. 2020;4(4):CD013280. doi:10.1002/14651858.CD013280.pub2
 16. Yoshimatsu H, Karakawa R, Scaglioni MF, et al. Intraoperative ICG angiography for detecting flap congestion in DIEP flaps. *Microsurgery*. 2021;41(5):522-6. doi:10.1002/micr.30749
 17. Holm C, Mayr M, Höfter E, et al. Intraoperative evaluation of skin-flap viability using laser-induced fluorescence of indocyanine green: a prospective trial of 100 cases. *Br J Plast Surg*. 2002;55(8):635-44. doi:10.1054/bjps.2002.3957
 18. Chirappappa P, Chansoon T, Bureewong S, et al. ICG fluorescence imaging to determine TRAM flap zone IV border. *Plast Reconstr Surg Glob Open*. 2020;8(11):e3093. doi:10.1097/GOX.0000000000003093

19. Maldonado CJ, Wang T, Kovach SJ, Taylor JA, Serletti JM, Wu LC. Timing of presentation of the first signs of vascular compromise dictates salvage outcome of free flap transfers. *Plast Reconstr Surg.* 2007;120(1):187-95. doi:10.1097/01.prs.0000263333.93783.64
20. Keller A. Noninvasive tissue oximetry for flap monitoring: an initial study. *J Reconstr Microsurg.* 2007;23(3):189-97. doi:10.1055/s-2007-981448
21. Newman MI. Thermographic monitoring of DIEP flaps: reliability and limitations. *J Reconstr Microsurg.* 2011;27(1):57-62. doi:10.1055/s-0030-1263283
22. Kovacs L, Döllinger P, Papadopoulos NA, et al. Infrared thermography in DIEP flap surgery: a clinical evaluation. *J Reconstr Microsurg.* 2021;37(3):240-6. doi:10.1055/s-0040-1702956
23. Hirche C, Engel H, Kolios L, et al. Indocyanine green angiography in reconstructive surgery. *J Plast Reconstr Aesthet Surg.* 2020;73(2):341-7. doi:10.1016/j.bjps.2019.10.020
24. Hallock GG. The role of thermography in flap monitoring. *Microsurgery.* 2016;36(4):315-20. doi:10.1002/micr.22474
25. Smit JM, Zeebregts CJ, van der Hulst RR, Werker PM. Near-infrared spectroscopy in free flap surgery: a clinical review. *Microsurgery.* 2018;38(4):447-55. doi:10.1002/micr.30221
26. Lee BT, Matsui A, Winer JH, et al. Intraoperative near-infrared spectroscopy monitoring in DIEP flap breast reconstruction: correlation with outcomes. *Ann Plast Surg.* 2021;86(5):569-75. doi:10.1097/SAP.0000000000002740
27. de Weerd L, Weum S. Perfusion assessment with thermography in DIEP flaps. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2017;5(12):e1589. doi:10.1097/GOX.0000000000001589
28. Fujiwara T, Sotsuka Y, Omori H, et al. Thermal imaging and AI-based prediction of perfusion. *Plast Reconstr Surg Glob Open.* 2021;9(4):e3535. doi:10.1097/GOX.0000000000003535

29. Salgarello M, Visconti G, Barone-Adesi L. Postoperative monitoring of DIEP flap in breast reconstruction with near-infrared spectroscopy. *J Reconstr Microsurg.* 2018;34(6):383-8. doi:10.1055/s-0038-1639594
30. Matsui A, Lee BT, Winer JH, et al. Role of combined NIRS and ICG in flap monitoring. *J Surg Res.* 2018;229:85-93. doi:10.1016/j.jss.2018.03.029
31. Wong CH, Tan BK, Song C. The clinical utility of near-infrared spectroscopy in head and neck reconstruction. *Head Neck.* 2020;42(5):1024-31. doi:10.1002/hed.26075
32. Ireton JE, Rozen WM, Whitaker IS, et al. Real-time imaging in perforator flaps. *Clin Plast Surg.* 2017;44(1):41-50. doi:10.1016/j.cps.2016.09.005
33. Phillips BT, Lanier ST, Conkling N, et al. Intraoperative perfusion techniques can accurately predict mastectomy skin flap necrosis in breast reconstruction: results of a prospective trial. *Plast Reconstr Surg.* 2015;136(5):415e-21e. doi:10.1097/PRS.0000000000001721
34. Heitland A, Markowicz M, Pallua N. Thermographic imaging in flap assessment: clinical results. *Int J Med Robot.* 2012;8(2):207-13. doi:10.1002/rcs.456
35. Rozen WM, Whitaker IS, Acosta R. Advances in intraoperative perfusion assessment in reconstructive surgery. *Ann Plast Surg.* 2016;77(2):115-21. doi:10.1097/SAP.0000000000000720
36. Saint-Cyr M, Schaverien M, Arbique G, et al. Perforator flap perfusion: quantitative analysis of three-dimensional CT angiography and correlation with clinical outcomes. *Plast Reconstr Surg.* 2010;125(4):1065-76. doi:10.1097/PRS.0b013e3181d0a594
37. Patel KM, Lin SJ, Cheng MH. Indocyanine green angiography in reconstructive surgery: a meta-analysis. *Microsurgery.* 2015;35(6):442-8. doi:10.1002/micr.22398
38. Tanaka R, Akita S, Mitsukawa N. Near-infrared imaging and flap viability. *Plast Aesthet Res.* 2019;6:8. doi:10.20517/2347-9264.2019.08
39. Nahabedian MY. Flap monitoring techniques: a review. *Clin Plast Surg.* 2010;37(4):645-56. doi:10.1016/j.cps.2010.07.003

40. Newman MI. Evolving trends in flap monitoring: past to future. *J Reconstr Microsurg.* 2021;37(7):562-70. doi:10.1055/s-0040-1709689
41. Fiedler LS, Greve T, Ueberreiter K, et al. Perfusion in pedicled skin flaps: initial insights from smartphone-based thermal imaging protocol. *J Pers Med.* 2024;14(7):730. doi:10.3390/jpm14070730
42. Thiessen FEF, Vasile JV, Scheer FAJL, et al. Dynamic infrared thermography in DIEP flap reconstruction: a literature review. *Gland Surg.* 2019;8(6):748-56. doi:10.21037/gs.2019.11.05
43. Cruz-Segura A, Castillo-Márquez R, et al. Thermal imaging in non-estimable free flap reconstruction of the face. *J Reconstr Microsurg.* 2019;35(2):105-10. doi:10.1055/s-0038-1668538
44. Dalli J, Whitworth IH, McKeown DW, et al. Feasibility study assessing quantitative indocyanine green fluorescence angiography in immediate breast reconstruction. *JPRAS Open.* 2024;40:113-20. doi:10.1016/j.jpra.2024.06.005
45. Forcione M, Della Pepa GM, Stifano V, et al. Contrast-enhanced near-infrared spectroscopy for cerebral perfusion monitoring in traumatic brain injury. *Quant Imaging Med Surg.* 2020;10(3):2075-85. doi:10.21037/qims.2020.02.09
46. Fletcher RR, Vidal G, et al. Deep learning models predict surgical site infection using smartphone thermal images. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc.* 2021;2021:5047-50. doi:10.1109/EMBC46164.2021.9630797
47. Danciu R, Danciu BA, Vasiu LS, Avino A, Filip CI, Hariga CS, Răducu L, Jecan RC. Deep learning-based flap detection system using thermographic images in plastic surgery. *Appl Syst Innov.* 2024;7(6):101. doi:10.3390/asi7060101