

Infrared thermography as an adjunct to ICG (*Indocyanine Green*) angiography for the assessment of perfusion in DIEP (*Deep Inferior Epigastric Perforator*) flaps: a pilot study of correlation and concordance

Termografía infrarroja como adjunto a la angiografía ICG (*Indocyanine Green*) para la evaluación de la perfusión en colgajos DIEP (*Deep Inferior Epigastric Perforator*): un estudio piloto de correlación y concordancia

 **Paúl Robledo Madrid,^{1*}**

 **Ivonne Uscanga Mejía,²**

 **Héctor Faustino Noyola Villalobos.³**

¹Secretaría de la Defensa Nacional, Hospital Central Militar, Ciudad de México, México.

²Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Puebla, México.

³Secretaría de la Defensa Nacional, Escuela Militar de Graduados de Sanidad, Ciudad de México, México.

***Autor de correspondencia:** Paul Robledo Madrid. Dirección: Avenida Forestal 14, San Lorenzo Huipulco, Ciudad de México. Correo electrónico: drpaulrobledo@gmail.com

Citación: Robledo Madrid P, Uscanga Mejía I., Noyola Villalobos H. F. *Termografía infrarroja como adjunto a la angiografía ICG (Indocyanine Green) para la evaluación de la perfusión en colgajos DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator): un estudio piloto de correlación y concordancia.* Rev. Sanid. Milit. 2026;80(1): 1-14.

Abstract:

Background: loss of tissue perfusion and fat necrosis in DIEP (*Deep Inferior Epigastric Perforator*) flap reconstruction, secondary to hypoperfusion, remains a cause of morbidity. ICG (*Indocyanine Green*) angiography is the current gold standard for intraoperative assessment but may overestimate ischemia. Similarly, infrared thermography technologies can estimate the risk of necrosis and perfusion success. However, their combined use has not been studied. The objective of this study was to evaluate the correlation and concordance between the thermographic hotspot and ICG angiography.

Materials and methods: a pilot study was conducted on 12 patients undergoing breast reconstruction with a DIEP flap. Intraoperatively, flap perfusion was assessed with thermography using a thermal camera, and with ICG using the SPY-Q software scale.

Results: dual verification with ICG and the thermographic hotspot allowed for the detection of one case (8.7 %) with immediate postoperative ischemia that required a new arterial anastomosis. At the 12-month follow-up, the patient presented no major complications. The correlation between both technologies was significant for zones I and III ($p < 0.05$). Their concordance for estimating the zones used for perfusion diagnosis was significant, yet weak (Kappa=0.25, $p = 0.019$).

Conclusions: despite a weak statistical concordance, the combined use of thermography and ICG angiography in a dual-verification model proved to be clinically effective for minimizing fat necrosis. This dual strategy represents a promising tool for optimizing intraoperative decision-making.

Keywords: DIEP flap, Breast reconstruction, Thermography, Thermographic hotspot



Resumen

Antecedentes: la pérdida de la perfusión tisular y la necrosis grasa en la reconstrucción con DIEP, secundaria a hipoperfusión, sigue siendo una causa de morbilidad. La angiografía con ICG (Indocyanine Green) es el estándar actual para la evaluación intraoperatoria, pero puede sobreestimar la isquemia. También, tecnologías de termografía infrarroja permiten estimar riesgo de necrosis y éxito de perfusión. Sin embargo, su uso combinado no se ha estudiado. El objetivo de este estudio es evaluar la correlación y concordancia entre hotspot e ICG.

Material y métodos: estudio piloto con 12 pacientes sometidas a reconstrucción mamaria con colgajo DIEP (Deep Inferior Epigastric Perforator). En el intraoperatorio, la perfusión del colgajo se evaluó con termografía, por medio de cámara térmica; y también ICG con la escala del software SPY-Q.

Resultados: la doble verificación con ICG y hotspot permitió detectar un caso (8.7 %) identificando isquemia inmediata en el posoperatorio que requirió realización de una nueva anastomosis arterial. Al seguimiento a doce meses no presento complicaciones mayores. La correlación entre ambas tecnologías reportó ser significativa para las zonas I y III ($p>0.05$). Su concordancia para estimar zonas utilizadas para diagnóstico de perfusión fue significativa, pero débil (Kappa=0.25, $p=0.019$).

Conclusiones: a pesar de una débil correlación estadística, el uso combinado de termografía y angiografía ICG en un modelo de doble verificación demostró ser clínicamente eficaz para minimizar la necrosis grasa. Esta estrategia dual representa una herramienta prometedora para optimizar la toma de decisiones intraoperatorias.

Palabras clave: Colgajo DIEP, Reconstrucción mamaria, Termografía, Hotspot termográfico, Verde indocianina

INTRODUCCIÓN

El colgajo perforante de la arteria epigástrica inferior profunda (DIEP) se ha consolidado como la técnica de elección para la reconstrucción mamaria autóloga tras una mastectomía por cáncer de mama.

⁽¹⁾ Su principal ventaja radica en preservar la integridad del músculo recto abdominal, reduciendo la morbilidad de la zona donante.⁽²⁾ Sin embargo, el éxito de este complejo procedimiento microquirúrgico depende de una perfusión tisular adecuada.⁽³⁾ La perfusión inadecuada puede conducir a complicaciones devastadoras como la necrosis parcial o total del colgajo, con un impacto significativo en los resultados estéticos funcionales, retraso de tratamientos oncológicos adyuvantes, así como un aumento en la carga emocional y económica para la paciente y la institución.^(4,5)

La variabilidad en la perfusión de las zonas del colgajo, especialmente en las zonas contralaterales (II y IV), hace que la predicción basada únicamente en la evaluación clínica sea insuficiente.⁽⁶⁾ El estándar actual para la monitorización de la perfusión del colgajo sigue siendo la evaluación clínica de color, temperatura, turgencia y llenado capilar, complementada con ecografía Doppler portátil.⁽⁷⁾ A pesar de su utilidad, la evaluación clínica es subjetiva y, en ocasiones, incapaz de detectar fallos vasculares inminentes de manera oportuna.⁽⁸⁾ De estas observaciones, se desprende la necesidad de implementar métodos de evaluación que brinden mayor objetividad y precisión, aporten información en tiempo real y no sean invasivos.⁽⁹⁾

La angiografía con verde de indocianina (ICG) arroja una visualización clara, directa, de la perfusión arterial y el drenaje venoso en el tejido estudiado, razón por la cual ha ganado la preferencia de los profesionales médicos y de enfermería.^(10,11) En el caso particular de las operaciones de reconstrucción con colgajo, esta información contribuye a determinar la viabilidad del mismo y prevenir la incidencia de necrosis grasa en el tejido mamario intervenido.^(12,13) La observación de la perfusión del tejido mamario en tiempo real mediante ICG facilita al responsable de la cirugía determinar las zonas más adecuadas para llevar a cabo la resección del tejido hipoperfundido.^(14,15) Una de las limitaciones más importantes de la ICG es la tendencia a sobreestimar la extensión del tejido hipoperfundido, lo cual conlleva el riesgo de realizar resecciones sobre el tejido mamario sano.^(11,16)

Para prevenir esta situación, el ICG requiere de técnicas complementarias que otorguen una mayor precisión y certeza sobre los hallazgos en la perfusión del tejido mamario.⁽¹⁷⁾ Una de estas técnicas es la termografía infrarroja, la cual ofrece un panorama de carácter visual sobre la temperatura de la superficie tisular del colgajo sin requerir de la invasión de la misma.⁽¹⁸⁾ En la termografía, la diferencia y distribución de la temperatura del tejido mantienen una correlación con el flujo sanguíneo que éste recibe: a mayor irrigación, mayor temperatura y viceversa.⁽¹⁶⁾ La literatura ha reportado su utilidad como herramienta no invasiva para detectar el compromiso del colgajo para su salvamento;⁽¹⁹⁾ en el caso del DIEP se ha utilizado para estimar la posibilidad de necrosis del tejido mamario reconstruido y colgajo de piel con resultados satisfactorios.⁽²⁰⁾ No obstante, se ha reconocido que tiene mayor sensibilidad por los cambios de temperatura, pero menor especificidad que otros métodos, como los de imagen.⁽²¹⁾ La termografía no solo mide la temperatura general, sino que permite identificar el *hotspot* (punto de mayor temperatura del colgajo) como un marcador directo del perforasoma dominante, añadiendo una capa de información anatómico-funcional.

Este estudio tiene por objetivo evaluar nuestra hipótesis respecto al hecho que la ICG y la termografía no muestren una correlación numérica directa, la termografía puede funcionar como una prueba confirmatoria fisiológica. Específicamente, puede diferenciar la hipoperfusión clínicamente significativa (isquemia verdadera) de la hipoperfusión benigna, abordando así la principal limitación de la ICG: la sobreestimación de la necrosis.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó un estudio piloto con diseño observacional, prospectivo, longitudinal y correlacional, en el Instituto Nacional de Cancerología, tras la aprobación del Comité de Ética Institucional. Bajo muestreo

de casos consecutivos, se incluyeron a todas las pacientes sometidas a reconstrucción mamaria unilateral con colgajo DIEP entre octubre de 2023 y octubre de 2024. Los criterios de exclusión fueron pacientes que no aceptaron participar en el estudio. Todas las pacientes firmaron un consentimiento informado por escrito. Se recopilaron datos de cada paciente sobre las características demográficas y clínicas, así como datos quirúrgicos e intraoperatorios.

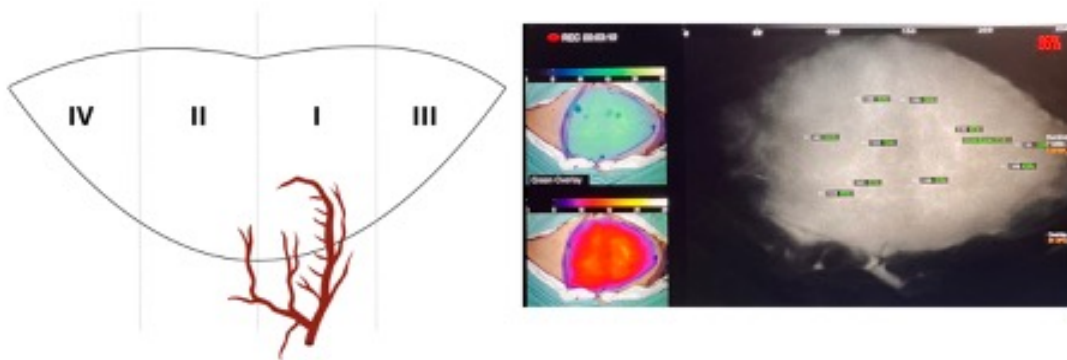
Protocolo de evaluación de perfusión intraoperatoria

Fase de preparación: la temperatura ambiente del quirófano se mantuvo entre 21° C y 24° C para estandarizar las condiciones de medición. Una vez completada la anastomosis microvascular y confirmada la reperusión del colgajo, se dejó un periodo de aclimatación de diez minutos antes de iniciar las evaluaciones de perfusión con termografía.

Para el análisis con ICG: se administró una dosis estandarizada de 2.5 mg (1 mL) de verde de indocianina en forma de bolo intravenoso rápido a través de un catéter venoso periférico. Inmediatamente después de la administración del ICG, y con las luces del quirófano atenuadas, el sistema de imagen SPY se posicionó sobre el colgajo para registrar la perfusión en tiempo real y se realizó la medición inmediatamente posteriores a la aplicación del fármaco. Para el análisis cuantitativo con el software SPY-Q, se estableció un punto de corte basado en evidencia, considerando como tejido hipoperfundido y en alto riesgo de necrosis grasa cualquier zona con una perfusión relativa inferior al 33 %.^(22,23)

Análisis de termografía: se utilizó una cámara térmica Storm™. Las mediciones de ambas técnicas se tomaron en zonas anatómicamente concordantes a lo largo del colgajo, incluyendo el *hotspot* designado. El *hotspot* se definió como el píxel con el valor de temperatura absoluta más alto dentro del perforasoma principal, medido en grados Celsius (°C); y se estimó la posibilidad de necrosis con los criterios de la literatura, con punto de corte en <26° C.⁽²⁰⁾ La temperatura ambiente del quirófano se mantuvo entre 21° C y 24° C. Se dejó aclimatar por diez minutos el colgajo a la temperatura ambiente del quirófano previo a la medición con el colgajo totalmente disecado y posterior a la anastomosis arterial y venosa.

Aspectos técnicos de las mediciones: Se consideró una distancia de 50 cm y un ángulo de 45 grados se colocó la cámara térmica respecto al colgajo. Se utilizó la base de la torre de laparoscopia para estandarizar la medición en todos los casos. Se definió como *hotspot* (punto de máxima temperatura): área identificada con el píxel exacto, mediante software que señalaba automáticamente el punto de mayor temperatura. Respecto a el protocolo ICG, se analizó el colgajo completo con el software SPY-Q. Modificando la propuesta del estudio publicado por Phillips, Momeni,⁽²⁴⁾ con la secuencia de medición en el momento exacto previo a la anastomosis, asegurando el mismo estado fisiológico y posterior a la anastomosis se verificó con cámara termográfica (**Imagen 1**).

Imagen 1. Esquema de diseño del colgajo

Esquema de diseño del colgajo que se emplea en nuestros casos clínicos (izquierda). Evaluación intraoperatoria de un colgajo DIEP mediante una angiografía por fluorescencia con verde de indocianina que identifica las áreas con adecuada perfusión en un colgajo DIEP después de disección de colgajo abdominal (derecha). Este diseño del colgajo se marcó bajo angiografía y la porción resultante fue resecada antes de su inserción (derecha superior). La misma área de colgajo fue evaluada por termografía, destacando la importancia de la doble verificación del colgajo para detectar datos de hipoperfusión (derecha inferior).

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico descriptivo, con las variables escalares se reportaron medidas de tendencia central (media) y de dispersión (desviación estándar). Para las variables categóricas, se reportaron frecuencias y porcentajes. Para el análisis estadístico inferencial, se utilizaron pruebas de correlación de Pearson y Rho de Spearman —bajo previa prueba de normalidad con Shapiro Wilk— para evaluar la relación entre diámetro perforante dominante y distancia de la perforante a la cicatriz, así como para la relación de temperatura del *hotspot* y el valor de perfusión cuantitativa de la ICG; previamente, se estandarizaron los datos de ambos métodos, ya que reportan datos en unidades de medida diferentes (porcentajes y grados Celsius). También se utilizaron pruebas de concordancia con Kappa de Cohen, para identificar la coincidencia del éxito de perfusión con ICG y el riesgo de necrosis con *hotspot*. Se consideró estadísticamente significativo un valor de $p < 0.05$. Todos los análisis se realizaron con el software estadístico SPSS v28.

RESULTADOS

El estudio tuvo un total de doce pacientes, correspondientes a doce colgajos DIEP. La edad de las pacientes tuvo una media de 51.16 años (DE=9.2, rango= 40-68 años). Por grupos de edad, los pacientes se encontraron principalmente en el rango de 41 a 60 años (66.7 %, $n=8$). En cuanto a sus antecedentes, 66.5 % ($n=8$) no reporta comorbilidades, 25 % ($n=3$) diabetes *mellitus* tipo 2 y 8.30 % ($n=1$) hipertensión arterial. Ninguna paciente reportó antecedente de tabaquismo, 58.3 % ($n=7$) una

ASA I y 58.3 % (n=7) tuvo como antecedente oncogénico cáncer en la mama derecha y 41.7 % (n=5) en la mama izquierda (Tabla 1).

Tabla 1. Características de las pacientes

<i>Variable</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Porcentaje</i>
Edad		
< 40	2	16.7 %
41-60	8	66.7 %
>60	2	16.7 %
Comorbilidad		
Ninguna	8	66.70 %
Diabetes <i>mellitus</i>	3	25.00 %
Hipertensión arterial	1	8.30 %
Tabaquismo		
No	12	100.00 %
Si	0	0.00 %
ASA		
ASA I	7	58.30 %
ASA II	5	41.70 %
Lateralidad del cáncer		
Cáncer mama derecha	7	58.30 %
Cáncer mama izquierda	5	41.70 %
Análisis prequirúrgicos*		
Perforante dominante	$\bar{X}=1.67$	DE=0.40
Distancia desde cicatriz umbilical	$\bar{X}=32$	DE=13.89

Nota: \bar{X} = media; DE= desviación estándar; *con prueba de correlación de Rho de Spearman ($r=0.728$, $p=0.007$), bajo previa prueba de normalidad con Shapiro Wilk para diámetro perforante ($p=0.027$) y distancia de la perforante a la cicatriz ($p=0.260$).

De los doce colgajos analizados, 8 (66.7 %) correspondieron a reconstrucciones del lado izquierdo y 4 (33.3 %) del lado derecho. El análisis prequirúrgico mediante AngioTAC, las perforantes dominantes reportaron un diámetro promedio de 1.67 mm (DE=0.40) y una distancia media desde la cicatriz umbilical de 32 mm (DE=13.89). Estas mediciones tienen una correlación directamente proporcional y significativa ($r=0.728$, $p=0.007$); por lo que a medida que aumenta la distancia de la perforante a la cicatriz umbilical, aumenta también el diámetro.

Tras el uso de doble verificación de ICG y *hotspot*, una paciente dentro de la muestra (8.3 %) desarrolló isquemia inmediata en el posoperatorio, por lo cual fue necesaria una resección marginal del

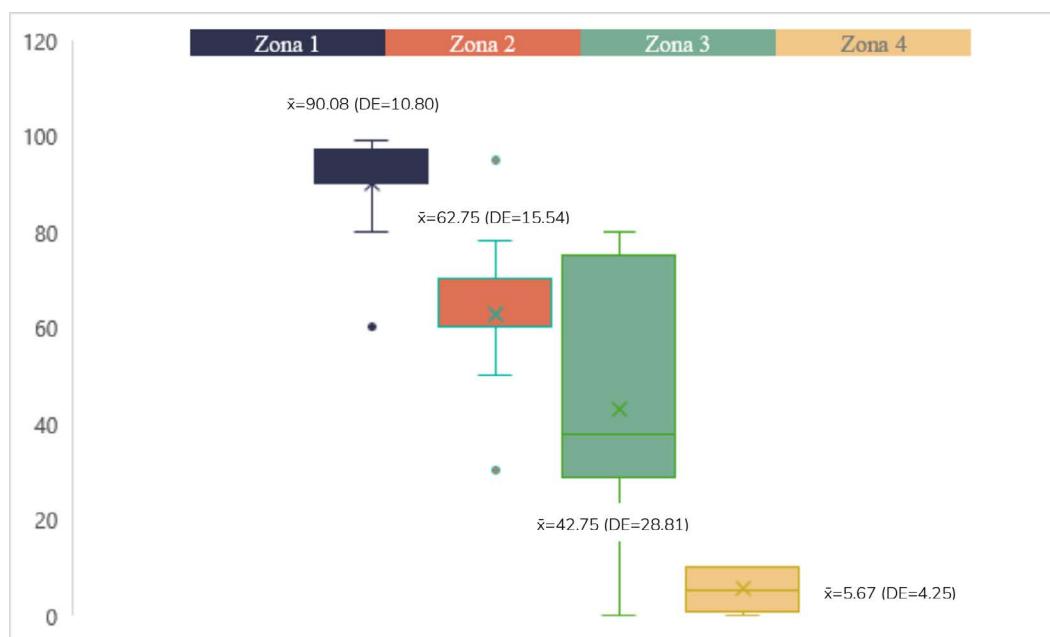
colgajo y realización de una nueva anastomosis arterial, la cual se realizó tomando los hallazgos con ICG como referente. Durante el seguimiento posoperatorio a doce meses esta paciente presentó en la semana seis (6.7 %) desarrollo necrosis grasa parcial (Tabla 2).

Tabla 2. Resultados de perfusión e isquemia

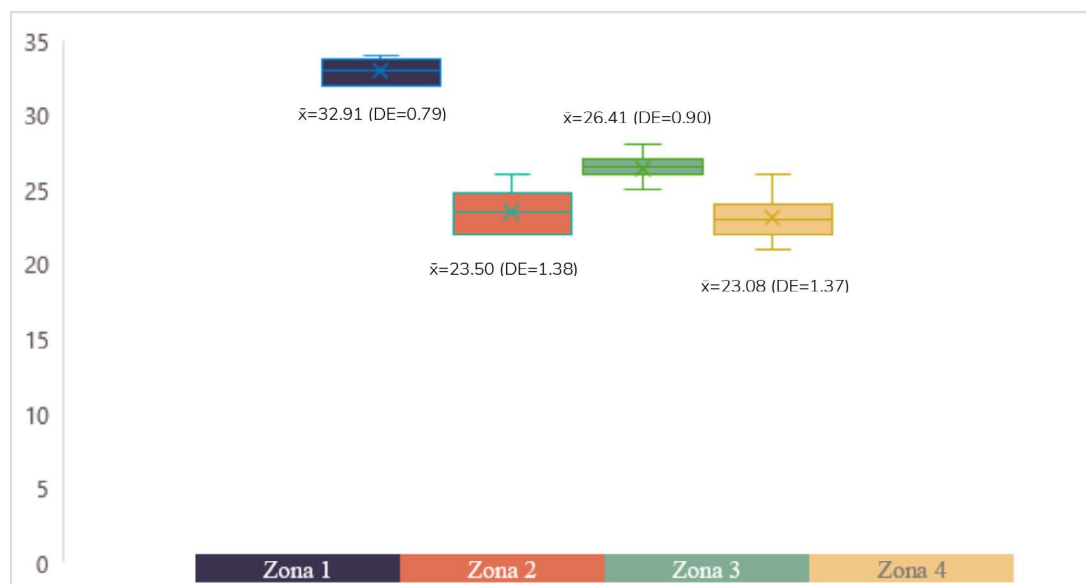
Lateralidad		
Izquierdo	8	66.7 %
Derecho	4	33.3 %
Isquemia posquirúrgica inmediata		
Presente	1	8.3 %
Ausente	11	91.7 %
Isquemia tardía		
Presente	0	0.0 %
Ausente	11	100.0 %

En el análisis de la perfusión con ICG en el transoperatorio, la zona I reportó la media más alta de porcentaje de perfusión (90.08 %, DE=10.80); mientras que la zona IV reportó la media más baja (5.67 %, DE=4.25) (Gráfica 1). De igual modo, en el análisis de *hotspot*, la zona I reportó la temperatura en grados Celsius (°) más alta (32.91°, DE=0.79) y la zona IV la más baja (23.08°, DE=1.37) (Gráfica 2).

Gráfica 1. Medias de ICG por zonas



Nota: \bar{X} = media; DE= desviación estándar.

Gráfica 2. Medias de *hotspot* por zonas

Nota: \bar{X} = media; DE= desviación estándar.

Para identificar si hay una correlación entre ICG y *hotspot*, se realizaron pruebas de correlación. Para ello, primero se estandarizaron los datos de ambos métodos, dado que reportan valores diferentes: uno en porcentaje y otro en grados Celsius. Tras la estandarización de datos, los resultados muestran que ninguna zona tuvo correlación significativa entre ambos métodos ($p < 0.05$) (Tabla 3).

Tabla 3. Pruebas de correlación entre ICG y *hotspot*

Estadísticos	ICG y <i>hotspot</i>			
	Zona 1**	Zona 2*	Zona 3*	Zona 4*
Coeficiente de correlación	0.204	-0.091	-0.301	0.067
<i>P</i>	0.524	0.779	0.342	0.836

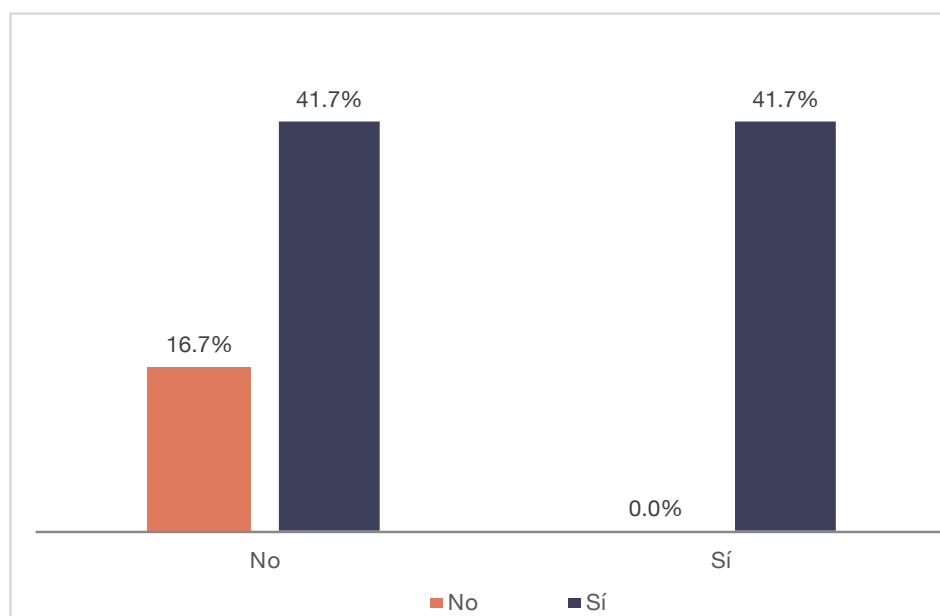
Nota: *con prueba de Pearson; **con prueba de Rho de Spearman, bajo previa prueba de normalidad de Shapiro Wilk.

En la medida en que los dos métodos no reportaron correlación, se procedió a evaluar su concordancia diagnóstica para identificar con valores más altos las zonas utilizadas para el diagnóstico final de perfusión. El análisis descriptivo de concordancia entre ICG y *hotspot* se hizo con un cuadro de calor para identificar las zonas que ambos métodos identifican con los valores más altos. Al respecto, ambos métodos logran identificar principalmente a la Zona I con los valores más altos. Sin embargo, las primeras diferencias comienzan a advertirse en las Zonas II y III: ICG reporta como segunda zona con valores más altos a la Zona II; mientras que, con *hotspot* la segunda zona es la Zona III (Tabla 4).

Tabla 4. Cuadro de calor de concordancia de ICGy *hotspot*

ICG (% de perfusión)				<i>Hotspot</i> (° celcius)			
Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV	Zona I	Zona II	Zona III	Zona IV
95	50	75	10	32	24	25	26
60	95	40	10	33	22	26	24
95	30	75	10	34	23	27	22
98	70	0	0	33	24	27	22
80	60	30	5	32	22	26	21
90	60	0	0	33	22	26	23
91	78	28	0	32	23	27	24
90	60	30	5	34	25	28	24
95	70	35	3	32	26	26	23
98	60	80	10	33	25	27	22
90	60	40	5	33	24	27	24
99	60	80	10	34	22	25	22

Con ambos métodos, la Zona IV reportó los valores más bajos. Para estimar la concordancia hallada en el análisis descriptivo, se realizó una prueba de Kappa de Cohen. El estadístico fue significativo ($p=0.019$), pero reportó una concordancia débil (0.25) (Gráfica 3).

Gráfica 3. Concordancia entre ISG y *hotspot* para estimar zonas para diagnóstico de perfusión

Nota: valor de Kappa de Cohen=0.25 ($p=0.019$).

Al clasificar los resultados de ICG por éxito en la perfusión, se encontró perfusión adecuada en la Zona I en 91.7 % de los colgajos (n=11). La Zona II y la Zona III mostraron una perfusión satisfactoria en 83.3 % (n=10) y 58.3 % (n=7), respectivamente. En La Zona IV no se reportó ningún caso perfundida adecuadamente. Mientras que al clasificar los resultados de *hotspot* por peligrosidad de necrosis, en la zona I todas reportaron no peligrosidad, en la zona II 91.6 % (n=11) reportaron con peligro; para la zona III 83.3 % (n=10) reportaron no peligrosidad y en la Zona IV 91.6 % (n=11) reportaron con peligrosidad. Al evaluar la concordancia entre el éxito de la perfusión con ICG y la peligrosidad hubo concordancia exacta en Zona I y IV —aunque no se pudo realizar Kappa de Cohen—; para las zonas II y III se reportaron concordancias débiles, pero no significativas ($p < 0.05$) (Tabla 5).

Tabla 5. Concordancia de perfusión exitosa con ICG y peligro de necrosis con *hotspot*

Peligro / Perfusión exitosa		Perfusión no exitosa	Perfusión exitosa	Kappa de Cohen
Zona 1	Sin peligro de necrosis	1	11	NA*
Zona 2	Con peligro de necrosis	2	9	0.036**
	Sin peligro de necrosis	0	1	
Zona 3	Con peligro de necrosis	0	2	0.313**
	Sin peligro de necrosis	5	5	
Zona 4	Con peligro de necrosis	11	0	NA*
	Sin peligro de necrosis	1	0	

Nota: *NA=no aplica; ** sin significancia estadística ($p < 0.05$).

DISCUSIÓN

El empleo de ICG en microcirugía permite evaluar el flujo sanguíneo/perfusión en tiempo real. La termografía mide el resultado metabólico de esa perfusión: el calor. Estos son fenómenos relacionados pero no idénticos; puede haber un desfase temporal o una relación no lineal. Un flujo bajo (ICG bajo) aún puede ser suficiente para mantener la viabilidad celular y generar calor (temperatura aceptable).

Dependiendo de la profundidad de medición podría la ICG ser más sensible a la perfusión dérmica/subdérmica superficial, mientras que la termografía refleja un estado térmico más integrado de todo el espesor del colgajo. Es por lo que se considera realizar la “doble verificación” para aumentar el éxito en estos colgajos mediante un algoritmo práctico:

- 1.- Evaluación primaria con ICG: identificar zonas bien perfundidas (claramente viables) y mal perfundidas (claramente no viables). El porcentaje de corte con ICG fue de 33 % y el porcentaje de corte con temperatura 26° C.(20,22,23)
- 2.- Evaluación secundaria de zonas dudosas: para las áreas con perfusión marginal o baja en ICG, utilizar la termografía como “prueba de desempate”.
- 3.- Toma de decisión: si una zona dudosa en ICG presenta una temperatura por encima del umbral de viabilidad (ej. >26-28° C), se puede optar por una resección más conservadora. Si la temperatura es baja, se confirma la decisión de resecar.

Los resultados de nuestro estudio en comparación con la literatura acerca de estudios que hayan comparado dos tecnologías de perfusión diferentes (ej. ICG vs. Flap Fino, Doppler vs. ICG) son limitados y ninguno explora o reporta discordancias estadísticas a pesar de la utilidad clínica.

El aporte fundamental de este estudio es la validación de la termografía cuantitativa intraoperatoria como un complemento objetivo y numérico a la angiografía con ICG para la evaluación de la perfusión en colgajos DIEP. Si bien la utilidad de la termografía para la localización preoperatoria de perforantes está bien establecida, nuestro trabajo se enfoca en su aplicación crítica durante la cirugía.

Se coincide con la literatura en que se tuvo éxito de perfusión al integrar ambos métodos,⁽¹⁷⁾ ya que el problema clínico de la necrosis grasa tuvo una incidencia (8.3 %, en isquemia). Así, ambos métodos ayudaron a prevenir necrosis en los once casos restantes, como sugieren estudios previos.^(12,13,20)

Tal hallazgo permite fundamentar la propuesta de este artículo, la cual denominamos una *doble verificación* derivada de la complementariedad de los dos métodos descritos hasta el momento. Por una parte, la ICG arroja una visualización concreta, anatómicamente, de la irrigación sanguínea en el tejido, con una sensibilidad alta para la detección de potenciales zonas de hipoperfusión. No obstante, la literatura reconoce una sobreestimación de la isquemia del tejido mamario.^(11,16) Aquí es donde la termografía aporta un indicador de contraste que complementa el diagnóstico, al proporcionar un *mapa fisiológico* basado en el calor, un subproducto directo del metabolismo celular.

La aplicación clínica del modelo de doble verificación en el quirófano ante un área señalada como *dudosa* por la ICG permitió al equipo quirúrgico recurrir al valor numérico de la termografía para tomar una decisión más informada. En el grupo estudiado, al identificar un área con flujo reducido en la ICG que mantiene una temperatura dentro de un rango viable, se optó por una resección más conservadora, lo cual permitió un mejor resultado estético al preservar el volumen del colgajo.

Esta estrategia aborda la necesidad clínica de una segunda tecnología que confirme la verdadera isquemia. En el único caso dentro de la muestra que presentó una complicación, ambas tecnologías coincidieron en la zona vascular, resultados que permitieron validar la decisión de resección y realizar una nueva anastomosis arterial y demostraron la seguridad que aporta un abordaje con *doble verificación*.

En suma, en términos clínicos la doble verificación permitió tomar mejores decisiones durante las cirugías. Ahora bien, al estimar en términos estadísticos la coincidencia entre ambas técnicas no se encontraron correlaciones significativas en las mediciones entre ICG y *hotspot* para las cuatro zonas. Por ello, se procedió a investigar su concordancia para el éxito de perfusión y de riesgo de necrosis. Para las zonas I, III y IV la coincidencia es amplia; aunque, en general, la concordancia es débil y no significativa, para estimar las mismas zonas para la perfusión.

Por otro lado, la discordancia principal entre ambos métodos se encuentra en la zona II, dado que con *hotspot* se observan más casos con peligro de necrosis y con ICG más casos con perfusión exitosa; por ello, la concordancia fue débil (0.036, $p > 0.05$). Esta discrepancia sugiere seguir investigando en estudios futuros. Al igual, esta disparidad permite advertir que ambos métodos sobreestiman extensión del tejido hipoperfundido, como reporta la literatura,^(11,16) incluso, en ambos métodos la zona IV se reportaron casos sin éxito y con mayor peligro de necrosis.

Al respecto, se puede reconocer que los resultados no significativos están relacionados con la principal limitación que observamos en esta investigación: el tamaño de la muestra ($n=12$). Reconocemos como demasiado reducida para generar inferencias de carácter amplio o extrapolar los hallazgos a casos donde

las condiciones, médicas o infraestructurales, sean diferentes. Al definirse como un estudio piloto, planteamos este estudio como un punto de partida para futuras líneas de investigación.

La presente investigación abre la oportunidad de realizar estudios multicéntricos con grupos de pacientes más grandes para evaluar y validar los hallazgos de nuestro estudio y desarrollar algoritmos estandarizados. Otra línea de investigación a futuro abordaría la integración de inteligencia artificial para la interpretación automatizada de los mapas termográficos, eliminando la subjetividad de la evaluación clínica y proporcionando alertas en tiempo real en el quirófano, así como para su uso en la monitorización postoperatoria continua a pie de cama.

También, los resultados estadísticos permiten advertir que son técnicas complementarias; especialmente, su discordancia en zona II pueden servir como indicadores que arrojen resultados más certeros para casos complicados de diagnosticar. Así, no se busca reemplazar a la ICG, sino potenciar. Múltiples estudios confirman que la ICG permite predecir con éxito necrosis, al igual que los estudios termográficos.^(12,13,19,20) A lo anterior, debe sumarse que se trata de una tecnología relativamente económica para los centros de salud y cuyo equipamiento no requiere ser repuesto más allá del mantenimiento básico.

CONCLUSIONES

Concluimos que la termografía y la angiografía ICG no son intercambiables, sino tecnologías complementarias. A pesar de una débil correlación numérica, su uso combinado en un modelo de doble verificación permite optimizar la especificidad en la evaluación de la perfusión del colgajo DIEP. Esta estrategia ayuda al cirujano para tomar decisiones más informadas, preservando tejido viable que la ICG por sí sola podría haber descartado, y confirmando la resección en zonas de verdadera isquemia. Este enfoque representa un paso adelante hacia una reconstrucción microquirúrgica mamaria más segura permitiendo mejores resultados estéticos y es totalmente aplicable a casos más complejos de reconstrucción microquirúrgica como podría ser el trasplante de cara.

Por otro lado, el porcentaje de perfusión con ICG y los grados Celsius reportados con *hotspot* no guardan necesariamente una correlación significativa. Al igual, se reconoce que su concordancia diagnóstica para éxito de perfusión y riesgo de necrosis es débil. Por tanto, es indispensable mantener la investigación de ambas tecnologías combinadas para mejorar el éxito de perfusión tisular en colgajos DIEP.

REFERENCIAS

1. **Momeni A, Sheckter C.** Intraoperative Laser-Assisted Indocyanine Green Imaging Can Reduce the Rate of Fat Necrosis in Microsurgical Breast Reconstruction. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2020;145(3): 507e–513e. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000006547>.
2. **Chang EI, Ibrahim A, Liu J, Robe C, Suami H, Hanasono MM, et al.** Optimizing Quality of Life for Patients with Breast Cancer-Related Lymphedema: A Prospective Study Combining DIEP Flap Breast

- Reconstruction and Lymphedema Surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2020;145(4): 676e–685e. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000006634>.
3. **Ghilli M, Lisa AVE, Salgarello M, Papa G, Rietjens M, Folli S, et al.** Oncoplastic and reconstructive surgery in SENONETWORK Italian breast centers: lights and shadows. *Breast (Edinburgh, Scotland)*. 2024;73: 103601. <https://doi.org/10.1016/j.breast.2023.103601>.
4. **Hembd AS, Yan J, Zhu H, Haddock NT, Teotia SS.** Intraoperative Assessment of DIEP Flap Breast Reconstruction Using Indocyanine Green Angiography: Reduction of Fat Necrosis, Resection Volumes, and Postoperative Surveillance. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2020;146(1): 1e–10e. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000006888>.
5. **George RE, Elwood ET, Jones GE.** Indocyanine Green Angiography Overpredicts Postoperative Necrosis Compared to Multispectral Reflectance Imaging. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2023;151(3): 412e–419e. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000009917>.
6. **Duggal CS, Madni T, Losken A.** An outcome analysis of intraoperative angiography for postmastectomy breast reconstruction. *Aesthetic Surgery Journal*. 2014;34(1): 61–65. <https://doi.org/10.1177/1090820X13514995>.
7. **Min K, Oh SM, Kim EK, Eom JS, Han HH.** Analysis of Perfusion in the DIEP Flap: Role of the Location of the Perforator, Umbilicus, and Midline Crossing-Over Vessel. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2023;151(6): 1146–1155. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000010126>.
8. **Chatterjee A, Krishnan NM, Van Vliet MM, Powell SG, Rosen JM, Ridgway EB.** A comparison of free autologous breast reconstruction with and without the use of laser-assisted indocyanine green angiography: a cost-effectiveness analysis. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2013;131(5): 693e–701e. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31828659f4>.
9. **Phillips BT, Lanier ST, Conkling N, Wang ED, Dagum AB, Ganz JC, et al.** Intraoperative perfusion techniques can accurately predict mastectomy skin flap necrosis in breast reconstruction: results of a prospective trial. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2012;129(5): 778e–788e. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31824a2ae8>.
10. **Hembd A, Teotia SS, Zhu H, Haddock NT.** Optimizing Perforator Selection: A Multivariable Analysis of Predictors for Fat Necrosis and Abdominal Morbidity in DIEP Flap Breast Reconstruction. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2018;142(3): 583–592. <https://doi.org/10.1097/PRS.00000000000004631>.
11. **Komorowska-Timek E, Gurtner GC.** Intraoperative perfusion mapping with laser-assisted indocyanine green imaging can predict and prevent complications in immediate breast reconstruction. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2010;125(4): 1065–1073. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e3181d17f80>.
12. **Pestana IA, Coan B, Erdmann D, Marcus J, Levin LS, Zenn MR.** Early experience with fluorescent angiography in free-tissue transfer reconstruction. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2009;123(4): 1239–1244. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31819e67c1>.
13. **Liu DZ, Mathes DW, Zenn MR, Neligan PC.** The application of indocyanine green fluorescence angiography in plastic surgery. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 2011;27(6): 355–364. <https://doi.org/10.1055/s-0031-1281515>.
14. **Newman MI, Samson MC.** The application of laser-assisted indocyanine green fluorescent dye angiography in microsurgical breast reconstruction. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 2009;25(1): 21–26. <https://doi.org/10.1055/s-0028-1090617>.
15. **Blondeel PN, Van Landuyt KHI, Monstrey SJM, Hamdi M, Matton GE, Allen RJ, et al.** The ‘Gent’ consensus on perforator flap terminology: preliminary definitions. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2003;112(5): 1378–1383; quiz 1383, 1516; discussion 1384–1387. <https://doi.org/10.1097/01.PRS.0000081071.83805.B6>.
16. **Holm C, Mayr M, Höfter E, Ninkovic M.** Perfusion zones of the DIEP flap revisited: a clinical study. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2006;117(1): 37–43. <https://doi.org/10.1097/01.prs.0000185867.84172.c0>.

17. Li K, Zhang Z, Nicoli F, D'Ambrosia C, Xi W, Lazzeri D, et al. Application of Indocyanine Green in Flap Surgery: A Systematic Review. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 2018;34(2): 77–86. <https://doi.org/10.1055/s-0037-1606536>.
18. Illg C, Krauss S, Rachunek K, Thiel JT, Daigeler A, Schäfer RC. Thermography Supported Color Duplex Ultrasound Accelerates ALT Perforator Imaging. *Journal of Reconstructive Microsurgery*. 2023;39(4): 295–300. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1755614>.
19. **Singla P, Dixit PK, Kala PC, Katrolia D, Karmakar S, Humnekar A, et al.** Free Flap Monitoring Using Infrared Thermography: An Objective Adjunct to Clinical Monitoring. *Indian Journal of Plastic Surgery: Official Publication of the Association of Plastic Surgeons of India*. 2024;57(3): 179–183. <https://doi.org/10.1055/s-0044-1786742>.
20. **Luze H, Nischwitz SP, Wurzer P, Winter R, Spendel S, Kamolz LP, et al.** Assessment of Mastectomy Skin Flaps for Immediate Reconstruction with Implants via Thermal Imaging-A Suitable, Personalized Approach? *Journal of Personalized Medicine*. 2022;12(5): 740. <https://doi.org/10.3390/jpm12050740>.
21. **Kim HH, Song IS, Cha RJ.** Advancing DIEP Flap Monitoring with Optical Imaging Techniques: A Narrative Review. *Sensors*. 2024;24(14): 4457. <https://doi.org/10.3390/s24144457>.
22. **Lauritzen E, Bredgaard R, Bonde C, Jensen LT, Damsgaard TE.** An observational study comparing the SPY-Elite® vs. the SPY-PHI QP system in breast reconstructive surgery. *Annals of Breast Surgery*. 2023;7(0). <https://doi.org/10.21037/abs-21-123>.
23. **Moyer HR, Losken A.** Predicting mastectomy skin flap necrosis with indocyanine green angiography: the gray area defined. *Plastic and Reconstructive Surgery*. 2012;129(5): 1043–1048. <https://doi.org/10.1097/PRS.0b013e31824a2b02>.