

ANÁLISE DO LAPLACIANO TÉRMICO EM IMAGENS TERMOGRÁFICAS PARA CARACTERIZAÇÃO DE PERFIS DE PERFUSÃO EM LESÕES POR PRESSÃO

Leomar Caetano de Oliveira¹, Catia Terezinha Heimbecher², Patrícia Jucele da Silva Voziniak², Jose Carlos Pereira Coninck², Leandra Ulbricht²

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil
(leomar@alunos.utfpr.edu.br)

² Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil

Resumo: As lesões por pressão representam um problema relevante na prática clínica, em razão da morbidade associada e da necessidade de métodos quantitativos que contribuam para a análise objetiva da perfusão cutânea. Nesse contexto, a termografia infravermelha constitui uma alternativa promissora para a obtenção de informações térmicas da superfície corporal; no entanto, sua interpretação ainda é predominantemente qualitativa ou baseada em métricas globais, o que limita a análise das lesões por pressão. Diante disso, observa-se uma lacuna na aplicação de métodos matemáticos capazes de descrever quantitativamente essa perfusão. O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho do Laplaciano térmico como indicador de padrões de perfusão em imagens termográficas de pacientes em risco de lesão por pressão, por meio da análise comparativa de curvas de nível de perfis térmicos distintos. Foi realizado um estudo descritivo, com abordagem quantitativa, utilizando imagens termográficas de um banco de dados previamente constituído a partir de pacientes internados em unidade de terapia intensiva. A imagem foi organizada como uma matriz bidimensional de temperaturas, da qual foram extraídas curvas de nível com comportamentos espaciais distintos. Para cada curva, foi ajustada uma superfície térmica por meio de um modelo linear generalizado, seguido do cálculo do gradiente e do Laplaciano térmicos, bem como de estatísticas descritivas associadas. Os resultados permitiram identificar três perfis térmicos distintos: um perfil com curvatura positiva predominante e com maior intensidade de concentração térmica; um perfil com curvatura positiva de menor magnitude, caracterizando um regime intermediário; e um perfil com curvatura negativa predominante, associado a maior heterogeneidade espacial. Esses achados indicam que o Laplaciano térmico discrimina padrões que não são adequadamente identificados apenas por medidas globais, como temperatura média ou amplitude térmica, evidenciando o potencial da modelagem matemática como ferramenta quantitativa complementar na caracterização de imagens termográficas relacionadas às lesões por pressão.

Palavras-chave: lesões por pressão; termografia infravermelha; laplaciano térmico; perfusão tecidual; modelagem matemática.

INTRODUÇÃO

As lesões por pressão (LPPs), também conhecidas como escaras, são lesões decorrentes de deformações na pele e nos tecidos moles subjacentes, resultantes de pressão isolada ou combinada com forças de cisalhamento exercidas pelo peso corporal ou por dispositivos médicos (EPUAP, 2019). Esses fatores levam à restrição do fluxo sanguíneo, hipóxia tecidual e inflamação, manifestando-se desde pele intacta até feridas abertas, frequentemente acompanhadas de dor (EPUAP, 2019; Martinez-Torija, 2025; Jayabal, 2023; Beriso, 2024).

As LPPs desenvolvem-se preferencialmente em áreas de proeminência óssea (EPUAP, 2019) e são particularmente prevalentes em indivíduos com mobilidade reduzida ou internados em unidades de terapia intensiva (UTI) (EPUAP, 2019; Alito, 2023; Gheri, 2023).

Na prática clínica, a avaliação de risco é realizada por meio de escalas como Braden, Norton e Waterlow, baseadas em variáveis clínicas, como mobilidade, nutrição, umidade e fricção/cisalhamento (Picoito, 2023; Borghardt, 2015; Shi, 2021; Yang, 2024; Shang, 2025). Embora amplamente utilizadas, essas ferramentas dependem do julgamento clínico do

avaliador, podendo gerar variabilidade inter e intra observador e dificultar a detecção precoce de alterações perfusionais (Hillier, 2025).

Nesse contexto, a termografia infravermelha (TI) surge como um método complementar que permite a medição objetiva da distribuição térmica da superfície cutânea (Lin, 2021; Cai, 2021). Variações térmicas locais podem refletir alterações microcirculatórias associadas a processos inflamatórios ou isquêmicos, possibilitando a identificação precoce de regiões suscetíveis ao desenvolvimento de lesões (Jayabal, 2023; Chaves, 2015; Nam, 2024). No entanto, quando utilizada de forma isolada, sua interpretação ainda é predominantemente qualitativa ou baseada em métricas globais, como temperatura média ou amplitude térmica, o que limita a análise da organização espacial do campo térmico (Lin, 2021; Cai, 2021).

Nesse sentido, observa-se uma lacuna na aplicação de métodos quantitativos capazes de descrever a estrutura espacial da temperatura, a fim de embasar o diagnóstico, tanto no contexto das escalas clínicas quanto na análise por termografia infravermelha (Lin, 2021; Cai, 2021; Hillier, 2025; Li, 2002; Luo, 2023).

Do ponto de vista matemático, a distribuição de temperatura em tecidos biológicos pode ser descrita como um campo escalar contínuo associado a processos de condução térmica, perfusão sanguínea e geração metabólica de calor. Modelos baseados em equações diferenciais parciais, como a equação bio-térmica de Pennes, estabelecem essa relação ao conectar gradientes térmicos a termos fisiológicos (Pennes, 1948; Weinbaum, 1984; Diller, 1992). Nesse contexto, o operador Laplaciano, associado à segunda derivada espacial da temperatura, descreve a curvatura da superfície térmica e está relacionado a processos de difusão e redistribuição de calor, permitindo identificar padrões espaciais que não são capturados por medidas térmicas globais (Li, 2002; Luo, 2023).

Diante desse cenário, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do Laplaciano térmico como indicador de padrões de perfusão em imagens termográficas de pacientes em risco de LPP. Especificamente, busca-se modelar a superfície térmica a partir de curvas de nível representativas, estimar o Laplaciano térmico como medida da redistribuição espacial de calor e comparar perfis térmicos distintos quanto à sua organização espacial.

MATERIAL E MÉTODOS

Foi realizado um estudo descritivo, com abordagem quantitativa, utilizando imagens termográficas provenientes de um banco de dados previamente constituído com 30 indivíduos internados em unidade de terapia intensiva (UTI) de um hospital de referência

em Curitiba, Brasil. O estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética em Pesquisa (parecer nº 5.651.212).

Os critérios de inclusão abrangeram indivíduos acamados ou com mobilidade reduzida, classificados com ou sem lesão por pressão, conforme as diretrizes do *National Pressure Injury Advisory Panel* (NPIAP).

Para a análise matemática proposta, três curvas térmicas representativas foram selecionadas a partir do banco completo de imagens. Cada curva correspondeu a um padrão fisiológico distinto, permitindo a avaliação comparativa da distribuição espacial da temperatura e da curvatura térmica observada.

Aquisição das imagens termográficas

A aquisição das imagens termográficas das regiões glútea e sacral foi realizada com uma câmera infravermelha (Fluke TI32). O protocolo padronizado incluiu a exposição da região de interesse para aclimação térmica por cinco minutos em ambiente com temperatura controlada de $22 \pm 1^\circ\text{C}$, monitorada por termo-higrômetro.

Durante a aquisição, os participantes foram posicionados em decúbito lateral, mantendo-se uma distância aproximada de 50 centímetros entre a superfície cutânea e a câmera.

Um exemplo da imagem óptica e da imagem termográfica correspondente é apresentado na figura 1.

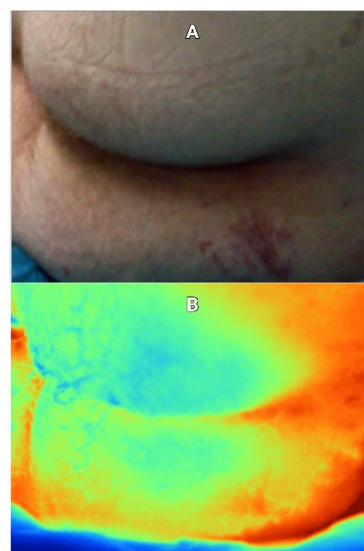


Figura 1. Exemplo de aquisição: (a) imagem óptica da região analisada; (b) imagem termográfica

Processamento das imagens e extração das curvas térmicas

Todo o processamento foi realizado no software R (versão 4.3.0). A imagem termográfica foi organizada como uma matriz bidimensional de temperaturas,

permitindo representar a distribuição espacial térmica como uma função escalar $T(x, y)$.

A partir dessa matriz, foram obtidas curvas de nível térmico, definidas como conjuntos de pontos que compartilham o mesmo valor de temperatura. A figura 2 mostra as três curvas com padrões espaciais distintos. Essas curvas foram denominadas P1, P2 e P3.

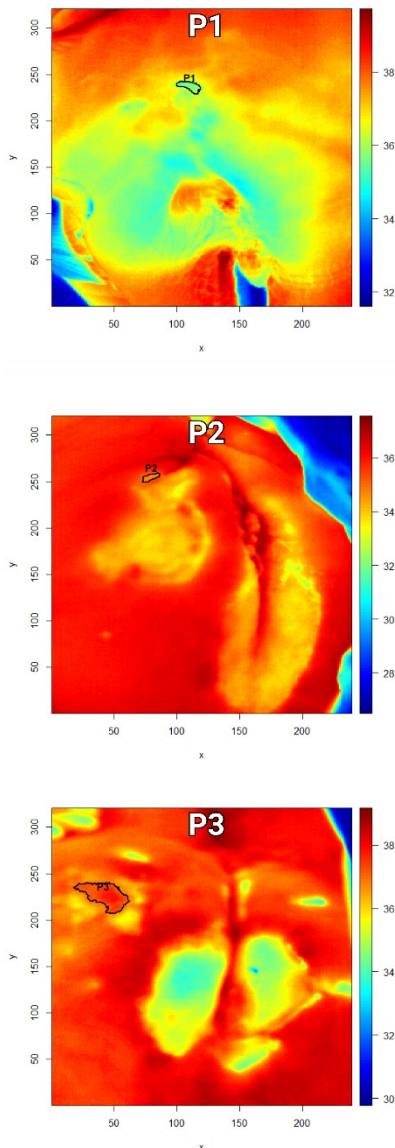


Figura 2. Curvas de nível térmico selecionadas (P1, P2 e P3), representando diferentes padrões espaciais da distribuição de temperatura.

Cada curva foi considerada como região de interesse, sendo delimitada espacialmente para extração dos dados térmicos locais utilizados na modelagem da superfície.

Modelagem da superfície térmica

Para cada região selecionada, a distribuição espacial da temperatura foi modelada por meio de um Modelo

Linear Generalizado (GLM), assumindo distribuição normal e função de ligação identidade.

A superfície térmica foi representada por uma função polinomial em duas variáveis, permitindo descrever a variação espacial da temperatura em cada região analisada. A estrutura final do modelo foi definida por seleção automática de termos, preservando apenas aqueles estatisticamente relevantes para a representação da geometria térmica local.

A partir desse ajuste, foram obtidas superfícies térmicas tridimensionais, utilizadas como base para a análise diferencial.

Cálculo do Gradiente e do Laplaciano térmico

Após o ajuste da superfície térmica, calculou-se o gradiente térmico, empregado para descrever a direção e a intensidade da maior variação local da temperatura. Em seguida, foi calculado o Laplaciano térmico, adotado como parâmetro central da análise por representar a curvatura local da superfície térmica.

A formulação adotada baseia-se na relação entre a condução térmica e a perfusão sanguínea, conforme apresentado na fórmula 1.

$$\nabla \cdot (k \nabla T) - \rho_b c_b \omega_b (T - T_a) + q_m = 0 \quad (1)$$

Em que k representa a condutividade térmica do tecido, ρ_b é a densidade do sangue, c_b é o calor específico do sangue, ω_b é a taxa de perfusão sanguínea, T é a temperatura tecidual, T_a é a temperatura arterial e q_m representa a geração metabólica de calor.

Sob a hipótese de homogeneidade local dos parâmetros térmicos e desprezando variações espaciais de k , a equação pode ser reduzida a uma forma proporcional ao operador Laplaciano, conforme apresentado na fórmula 2.

$$\nabla^2 T(x, y) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y) \quad (2)$$

Esse operador permite distinguir regiões com distribuição térmica aproximadamente homogênea, quando os valores se mostraram próximos de zero, de regiões com curvatura térmica mais pronunciada, quando os valores assumiram magnitudes positivas ou negativas. Dessa forma, o Laplaciano foi utilizado para resumir matematicamente diferenças entre os perfis térmicos representados pelas três curvas selecionadas.

Análise estatística

Para cada curva analisada, foram calculadas estatísticas descritivas dos valores do Laplaciano térmico, incluindo número de pontos, média, desvio padrão, valores mínimo e máximo e intervalo de confiança de 95%.

Em seguida, foi aplicado o teste t de Student para avaliar a hipótese nula de Laplaciano médio igual a zero, conforme apresentado na fórmula 3.

$$H_0: \mu \nabla^2 T = 0 \quad (3)$$

A não rejeição dessa hipótese foi interpretada como indicativo de distribuição térmica aproximadamente homogênea, enquanto sua rejeição foi considerada evidência de curvatura térmica significativa.

Todas as análises adotaram nível de significância de 5%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise matemática identificou três perfis térmicos distintos de distribuição espacial da temperatura.

Perfil 1: superfície térmica com curvatura positiva predominante

A Figura 3 apresenta o Perfil 1. No painel (a), observa-se uma superfície térmica ajustada com elevação central bem definida e variação espacial contínua. No painel (b), o campo vetorial do gradiente apresenta vetores organizados e direcionados, indicando convergência térmica e maior intensidade de variação na região analisada.

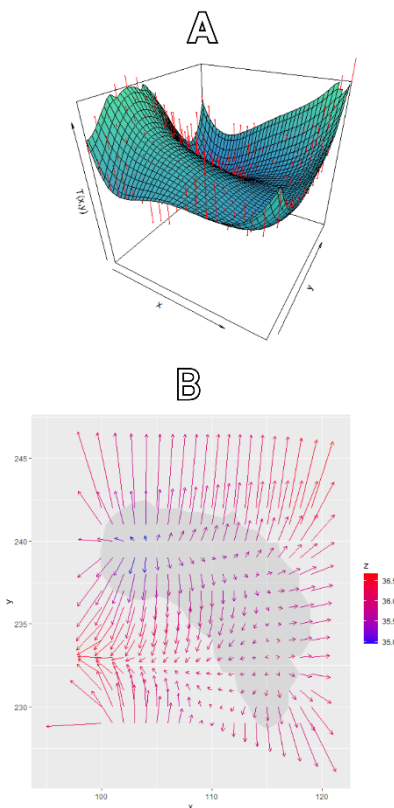


Figura 3. Perfil 1. (a) Superfície térmica ajustada; (b) campo vetorial do gradiente correspondente.

Para esse perfil, o teste em relação ao valor de referência térmica indicou diferença estatisticamente

significativa ($\rho = 5,233728 \times 10^{-79}$). O Laplaciano térmico apresentou média $\nabla^2 T = 0,0708$; desvio-padrão de 0,1042; intervalo de confiança de 95% entre 0,0585 e 0,0830; e valor de $\rho = 7,33134 \times 10^{-25}$ no teste t para a hipótese nula de média igual a zero.

Esses resultados indicam curvatura positiva significativa, caracterizando uma superfície com concentração térmica local bem definida. Do ponto de vista físico-matemático, esse comportamento está associado as regiões com convergência do fluxo térmico, compatível com padrões de redistribuição de calor descritos por operadores diferenciais em campos escalares (Li, 2002; Luo, 2023). Esse tipo de configuração sugere maior organização espacial da temperatura, o que pode refletir alterações locais de perfusão tecidual.

Perfil 2: superfície térmica com curvatura positiva moderada

A Figura 4 apresenta o Perfil 2. No painel (a), a superfície térmica ajustada mostra variação espacial mais distribuída, com elevação menos pronunciada em comparação ao perfil anterior. No painel (b), o campo vetorial do gradiente apresenta vetores organizados, porém com menor intensidade relativa.

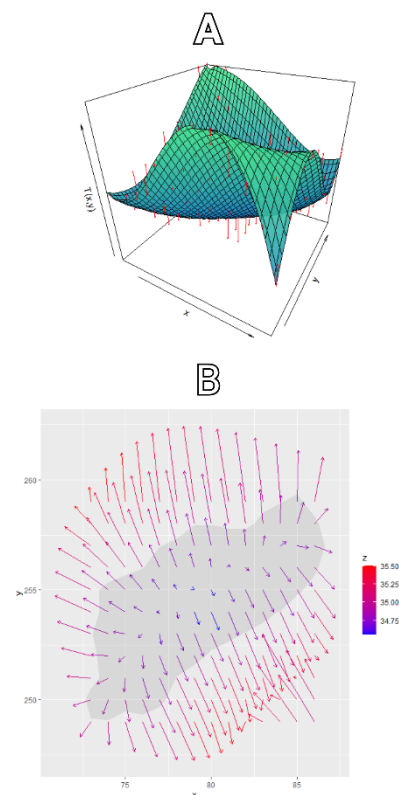


Figura 4. Perfil 2. (a) Superfície térmica ajustada; (b) campo vetorial do gradiente correspondente.

Nesse perfil, o teste em relação ao valor de referência térmica também foi estatisticamente significativo

($\rho = 2,637917 \times 10^{-89}$). O Laplaciano térmico apresentou média $\nabla^2 T = 0,0428$, desvio-padrão de 0,0696, intervalo de confiança de 95% entre 0,0295 e 0,0562; e valor de $\rho = 2,51142 \times 10^{-9}$ no teste t para a hipótese nula de média igual a zero.

A média positiva e significativa indica curvatura positiva, porém com menor magnitude em relação ao Perfil 1, caracterizando um regime intermediário de organização térmica. Esse comportamento sugere uma redistribuição térmica mais difusa, ainda organizada, mas com menor concentração de fluxo. Sob a perspectiva da modelagem térmica, isso pode estar relacionado a um equilíbrio parcial entre condução e perfusão, conforme descrito em modelos bio-térmicos clássicos (Pennes, 1948; Weinbaum, 1984).

Perfil 3: superfície térmica com curvatura negativa predominante

A Figura 5 apresenta o Perfil 3. No painel (a), a superfície térmica ajustada apresenta configuração mais irregular, com regiões de depressão e variação espacial mais heterogênea. No painel (b), o campo vetorial do gradiente evidencia maior dispersão direcional dos vetores, indicando menor uniformidade na redistribuição térmica.

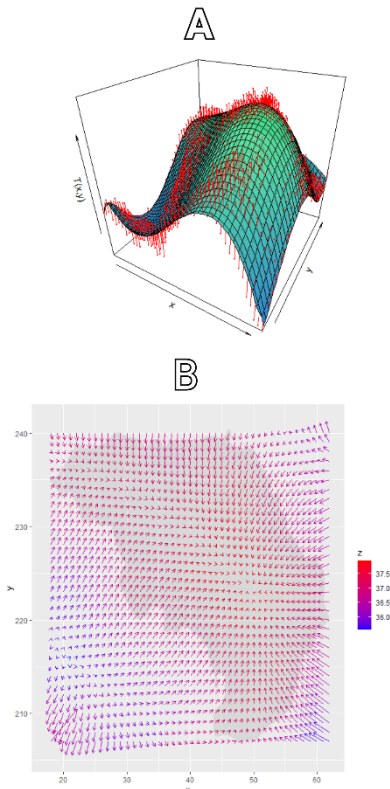


Figura 5. Perfil 3. (a) Superfície térmica ajustada; (b) campo vetorial do gradiente correspondente.

Para esse perfil, o teste em relação ao valor de referência térmica mostrou significância estatística ($\rho = 4,971998 \times 10^{-165}$). O Laplaciano térmico

apresentou média $\nabla^2 T = -0,00638$; desvio-padrão de 0,01064; intervalo de confiança de 95% entre $-0,00813$ e $-0,00464$; e valor de $\rho = 1,06999 \times 10^{-12}$ no teste t para a hipótese nula de média igual a zero.

A média negativa e significativamente diferente de zero caracteriza um perfil com curvatura negativa predominante, porém de baixa magnitude, indicando uma superfície com depressão térmica suave e maior heterogeneidade espacial. Esse padrão está associado a regiões com divergência do fluxo térmico, refletindo uma distribuição menos organizada da temperatura. Do ponto de vista matemático, esse comportamento é consistente com regiões onde o Laplaciano indica dissipação ou dispersão térmica, frequentemente associadas a maior heterogeneidade estrutural do campo térmico (Li, 2002; Luo, 2023).

Síntese comparativa dos perfis

A comparação entre os três perfis evidencia que o Laplaciano térmico permite distinguir diferentes regimes de organização espacial da temperatura. Enquanto os Perfis 1 e 2 apresentam curvatura positiva, com diferentes magnitudes de concentração térmica, o Perfil 3 apresenta curvatura negativa, associada a maior heterogeneidade espacial.

Esses resultados indicam que o Laplaciano térmico fornece informação estrutural que não é capturada por medidas globais, como temperatura média ou amplitude térmica. A análise da temperatura como uma superfície bidimensional permitiu extrair descritores diferenciais relevantes, nos quais o gradiente representa a direção da variação térmica e o Laplaciano resume sua curvatura.

Esse comportamento está alinhado com estudos que utilizam operadores diferenciais para caracterização de campos térmicos, evidenciando sua capacidade de identificar padrões espaciais complexos (Li, 2002; Luo, 2023). Dessa forma, a modelagem matemática do campo térmico contribui para uma análise mais robusta da distribuição de temperatura, reduzindo a dependência de interpretações qualitativas (Lin, 2021; Cai, 2021).

Aspectos metodológicos e implicações

A modelagem das superfícies térmicas por funções polinomiais mostrou-se adequada para representar a geometria local da temperatura e permitir o cálculo das derivadas necessárias para a obtenção do gradiente e do Laplaciano. Essa abordagem possibilitou a extração de descritores diferenciais consistentes com os padrões observados.

O presente estudo teve caráter metodológico, com foco na demonstração da capacidade do Laplaciano térmico em identificar perfis distintos de organização espacial a partir de uma imagem representativa. As



curvas analisadas foram selecionadas por sua representatividade geométrica, permitindo evidenciar diferentes regimes térmicos.

Embora a interpretação fisiopatológica deva ser realizada com cautela, os resultados indicam que métricas baseadas em operadores diferenciais podem ser incorporadas a abordagens quantitativas para análise de imagens termográficas. Nesse contexto, a integração com métodos de aprendizado de máquina representa uma perspectiva promissora para aplicações futuras, especialmente na classificação automática de padrões térmicos (Aldughayfiq, 2023; Hillier, 2025).

CONCLUSÃO

Este estudo avaliou o operador Laplaciano térmico ($\nabla^2 T$) como indicador quantitativo da organização espacial da temperatura em imagens termográficas de regiões em pacientes em risco de lesão por pressão. A análise de três perfis térmicos representativos evidenciou:

- Perfil com curvatura positiva predominante e maior magnitude, associado a concentração térmica local e maior organização espacial;
- Perfil com curvatura positiva de menor magnitude, caracterizando um regime intermediário de distribuição térmica;
- Perfil com curvatura negativa de baixa magnitude, associado a maior heterogeneidade espacial e menor organização do campo térmico.

Os resultados demonstram que o Laplaciano térmico permite discriminar padrões espaciais que não são capturados por métricas globais, como temperatura média ou amplitude térmica, fornecendo uma descrição quantitativa da estrutura do campo térmico.

Dessa forma, o estudo contribui para a lacuna identificada na literatura ao propor uma abordagem baseada em operadores diferenciais para a caracterização da distribuição espacial da temperatura em imagens termográficas.

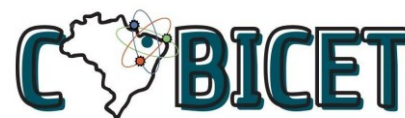
Embora de caráter metodológico, os achados indicam que métricas baseadas no Laplaciano podem ser exploradas em abordagens futuras para classificação de perfis térmicos e apoio à identificação de alterações associadas a lesões por pressão. Assim, a principal contribuição deste trabalho consiste em demonstrar que a modelagem matemática do campo térmico permite caracterizar, de forma objetiva, diferentes regimes de organização espacial da temperatura.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Araucária pela concessão da bolsa PIBIC (Edital 2025). À UTFPR e ao PPGEB pelo suporte institucional.

REFERÊNCIAS

- Alito, A. et al. Pressure Ulcers—A Longstanding Problem: A 7-Year Neurorehabilitation Unit Experience. *Diagnostics*, v. 13, n. 20, 2023.
- Aldughayfiq, O. et al. Artificial intelligence approaches for medical image analysis: A review. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2023.
- Beriso, H. B.; Zemene, W.; Tesfaye, E. Prevalence of pressure ulcers and associated factors among adult patients admitted at Comprehensive Specialized Hospital, Northwest Ethiopia. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, 2024.
- Borghardt, A. T. et al. Evaluation of the pressure ulcers risk scales with critically ill patients. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, v. 23, n. 1, p. 28–35, 2015.
- Cai, F. et al. Application of infrared thermography in the early warning of pressure injury. *Journal of Clinical Nursing*, v. 30, n. 3–4, p. 559–571, 2021.
- Chaves, M. E. A. et al. Evaluation of healing of pressure ulcers through thermography: A preliminary study. *Revista Brasileira de Engenharia Biomédica*, v. 31, n. 1, p. 3–9, 2015.
- Diller, K. R. Modeling of bioheat transfer processes at high and low temperatures. *Advances in Heat Transfer*, v. 22, p. 157–357, 1992.
- European Pressure Ulcer Advisory Panel; National Pressure Injury Advisory Panel; Pan Pacific Pressure Injury Alliance. *Prevention and Treatment of Pressure Ulcers/Injuries: Clinical Practice Guideline*. London: EPUAP, 2019.
- Gheri, C. F. et al. Relationship between Nutritional Risk, Clinical and Demographic Characteristics, and Pressure Ulcers. *Nutrients*, v. 15, n. 15, 2023.
- Hillier, B. et al. Accuracy and clinical effectiveness of risk prediction tools for pressure injury occurrence. *PLoS Medicine*, v. 22, n. 2, p. e1004518, 2025.
- Jayabal, H. et al. Inflammatory biomarkers in sebum for identifying skin damage in patients with a Stage I pressure ulcer. *International Wound Journal*, v. 20, n. 7, p. 2594–2607, 2023.
- Li, H. J.; Zhang, X. X.; Yi, Y. F. Measurement of Blood Perfusion Using the Temperature Response to Constant Surface Flux Heating. *International Journal of Thermophysics*, v. 23, 2002.
- Lin, Y. H. et al. Higher periwound temperature associated with wound healing of pressure ulcers detected by infrared thermography. *Journal of Clinical Medicine*, v. 10, n. 13, 2021.



Luo, X. et al. Mathematical modeling and analysis of thermal fields in biomedical imaging. *Biomedical Signal Processing and Control*, v. 82, p. 104500, 2023.

Martínez-Torija, M. et al. Multifaceted Pathophysiology and Secondary Complications of Chronic Spinal Cord Injury: Focus on Pressure Injury. *Journal of Clinical Medicine*, v. 14, 2025.

Nam, H. J. et al. Correlation between transcutaneous oxygen pressure and infrared thermography. *International Wound Journal*, v. 21, n. 2, 2024.

Pennes, H. H. Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, v. 1, n. 2, p. 93–122, 1948.

Picoito, R. J. B. R. et al. Risk assessment instruments for pressure ulcer in adults in critical situation: a scoping review. *Revista Latino-Americana de Enfermagem*, v. 31, 2023.

Shang, Y. et al. Accuracy of risk assessment scale for pressure ulcers in surgical patients: a network meta-analysis. *BMC Surgery*, v. 25, 2025.

Shi, C. et al. Risk assessment tools for predicting pressure injuries: A systematic review. *International Wound Journal*, v. 18, n. 3, p. 230–243, 2021.

Weinbaum, S.; Jiji, L. M.; Lemons, D. E. A new bioheat equation for muscle tissue. *Journal of Biomechanical Engineering*, v. 106, n. 4, p. 321–330, 1984.

Yang, Q. et al. Comparing the Waterlow and Jackson/Cubbin pressure injury risk scales in ICUs. *International Wound Journal*, v. 21, n. 2, p. e14602, 2024.